LE SCIENZE
edizione italiana di SCIENTIFIC AMERICAN
numero 55
marzo 1973
anno VI
volume X

Tecnologia d'avanguardia in Cina

In questa relazione su un suo viaggio in Cina l'autore valuta la situazione in fondamentali campi di sviluppo industriale come l'elettronica, i calcolatori e la strumentazione

di Raphael Tsu

Premesse essenziali di un rapido sviluppo industriale sono la stabilità politica, l'energia della popolazione, la disponibilità di materie prime. In Cina queste condizioni fondamentali sono soddisfatte, ed è ormai evidente che il paese è andato sviluppando in questi ultimi tempi la propria industria pesante in modo notevole. Non altrettanto notevole, agli occhi dell'osservatore esterno, è il fatto che i cinesi si siano resi conto che l'industria moderna si fonda sulle tecnologie avanzate, che gli altiforni e persino le macchine utensili non bastano piú ad assicurare lo sviluppo di una nazione a carattere spiccatamente industriale. Nel corso di una visita compiuta l'estate scorsa alle università, ai centri di ricerca e agli impianti industriali cinesi, mi sono infatti convinto che la Cina sta edificando le strutture tecnologiche di base di cui ha bisogno. Ho potuto notare la presenza di un'alta tecnologia, soprattutto per quanto riguarda i calcolatori, i sistemi di controllo e la strumentazione, cioè gli elementi che consentono il funzionamento di una società industriale moderna.

Prima di riferire sull'alta tecnologia cinese, mi si consenta di passare rapidamente in rassegna i progressi realizzati nel paese in questi ultimi anni in quella che si potrebbe definire l'industria convenzionale. In base all'estrapolazione dei dati del 1971, è lecito attendersi per il 1972 un reddito nazionale lordo di circa 145 milardi di dollari con una produzione di circa 25 milioni di tonnellate di acciaio, 30 milioni di tonnellate di idrocarburi e 150 miliardi di chilowattore di energia elettrica. Rispetto agli USA, che producono il quintuplo di acciaio e una quantà quindici volte superiore di idrocarburi, i corrispondenti valori cinesi non sono certo elevati, ma non si possono fare confronti tra i due paesi senza tener conto del diverso modo di vivere. Mentre in USA si consumano forti quantitativi di acciaio per fabbricare gli autoveicoli e ingenti quantità di prodotti petroliferi per far marciare gli stessi autoveicoli, la Cina possiede un numero insignificante di mezzi a motore: può quindi disporre delle sue limitate riserve di acciaio e di petrolio per l'industria di base.

Con le sue forti riserve di carbone e di energia idroelettrica, la Cina dovrebbe essere in grado di avviare gran parte del grezzo attualmente estratto dai giacimenti manciuriani di Ta Ching al settore petrolchimico. Ho potuto visitare il complesso chimico e petrolifero di Pechino, che attualmente produce 8000 tonnellate al giorno di idrocarburi raffinati. Al pari dei piú moderni impianti di raffinazione, lo stabilimento è automatizzato: ho notato un quadro di comando lungo una decina di metri, tutto coperto dei soliti strumenti di registrazione, misurazione e commutazione. (Ricorderò di passaggio che le acque di rifiuto dello stabilimento sono trattate secondo i piú progrediti metodi biodegradanti e che l'effluente chiarificato viene sfruttato per l'irrigazione.) Il complesso comprende circa 35 unità di lavorazione, dove operano undicimila addetti. Altri undicimila operai sono impegnati nella realizzazione di un nuovo impianto petrolchimico per la sintesi di materie plastiche, di fertilizzanti e di Dacron.

Ho notato comunque ben altri sintomi di maturazione dell'industria pesante, per esempio una pressa idraulica da dodicimila tonnellate che, a quanto sembra, è una delle dieci macchine del genere esistenti al mondo. Alla mostra industriale permanente di Shangai è esposto il modello di un turboalternatore ad alta temperatura e alta pressione da 300 000 chilowatt che, a quanto si dice, è già in funzione presso diverse centrali; tra le sue caratteristiche piú avanzate mi limiterò a ricordare i conduttori interni raffreddati ad acqua non soltanto per lo statore, ma anche per il rotore. Alla mostra di Shangai si possono ammirare inoltre una macchina per estrusione da 200 tonnellate, una pressa meccanica da 250 tonnellate, un modello in scala 1:2 di un grande forno nonché fresatrici, torni e altre macchine utensili.

Quali realizzazioni servono soprattutto a collocare un paese tra le potenze industriali ad alta tecnologia? Certamente i simboli di prestigio appunto da grande potenza, quali l'aviogetto, le armi nucleari, i missili. Secondo la rivista americana « Aviation Week and Space Technology », la Cina costruirebbe già da tempo copie e varianti dei famosi caccia russi MIG, mentre non produce aerei a reazione civili. La Cina ha fatto esplodere un ordigno nucleare a fissione nel 1964 e un altro a fusione nel 1967, procedendo quindi a collaudare tutta una serie

di bombe all'idrogeno. Per la produzione dell'uranio-235, almeno secondo un articolo di Francis James comparso sul « Sunday Times » di Londra, i cinesi avrebbero edificato diversi impianti di centrifugazione gassosa, metodo che in occidente, pur essendosi dimostrato realizzabile in prove di laboratorio, non è ancora giunto a livello industriale. Si dice che i fisici cinesi stiano lavorando alla fusione controllata, non soltanto secondo le tecniche tradizionali in stato di plasma, ma anche con la metodologia di riscaldamento a laser. Si dice inoltre che siano già in grado di isolare i flussi neutronici, anche se la circostanza non è stata confermata dall'analisi spettrale dei neutroni. Quanto alla propulsione a razzo, « Aviation Week and Space Technology » affermava nel 1970 che la Cina era ormai la quinta nazione a mettere in orbita satelliti propri, mentre è accertato che collauda già da tempo missili per scopi militari.

In nessuno di questi campi sarebbe mai possibile conseguire risultati di sorta qualora non si disponesse di un completo arsenale di sistemi e di componenti d'alta tecnologia: calcolatori elettronici, sistemi di controllo automatici, dispositivi semiconduttori e a microonde, strumentazione sofisticata. Personalmente, in qualità di studioso della fisica dello stato solido, mi occupo e lavoro soprattutto in questi settori, ed è appunto di questo tipo di tecnologie che mi sono interessato in occasione del mio viaggio in Cina.

C'è stato un periodo in cui la Cina, per gran parte del suo fabbisogno tecnologico di base, doveva rivolgersi a fonti straniere, soprattutto all'URSS. A partire dall'inizio del 1960, anno della rottura con i sovietici, la polemica sulla capacità di raggiungere l'autosufficienza nei settori di base divenne una istanza cruciale nello scontro ideologico ed economico che nel 1966 doveva dar luogo alla rivoluzione culturale. È da quell'epoca che l'accento si è spostato sull'autosufficienza nella tecnologia, base della crescita industriale. Oggi nei laboratori e negli stabilimenti si può spesso notare un grande manifesto recante la scritta: « Mantenere l'indipendenza, conservare l'iniziativa nelle nostre mani, affidarci alle nostre sole forze ».

I cinesi riconoscono l'importanza vitale della tecnologia dei semiconduttori. Se ne è avuta la dimostrazione, per esempio, in occasione delle celebrazioni della festa nazionale nel 1970: nel corteo che si snodava nella piazza Tien En Man di Pechino figurava un enorme carro addobbato sul quale erano stati eretti un terminale di comando e un « puller » per monocristalli, ossia una sorta di crogiolo per la produzione di semiconduttori al silicio puro; il carro, sovrastato da un modello di lingotto monocristallino di silicio, era fiancheggiato e seguito da centinaia di operai recanti altri modellini di lingotto. Da dieci anni, intanto, la Commissione per gli scambi tecnici e scientifici finanzia un'iniziativa propagandistica volta a diffondere i concetti fondamentali della tecnologia elettronica e dei semiconduttori.

La ricerca e lo sviluppo sull'elettronica, nonché la fabbricazione dei componenti elettronici, hanno luogo in Cina a opera di una serie organizzata di istituti specializzati, di università, di impianti industriali. L'Istituto per i semiconduttori dell'Accademia delle scienze è stato fondato nel 1958 su iniziativa di Wang Shu-wu, autore nel 1949 di una tesi di laurea sull'energia di coesione dei metalli presso la Purdue University. I ricercatori dell'istituto iniziarono a lavorare sul germanio nel 1958, sul silicio nel 1961 e sui circuiti integrati nel 1963. Il laboratorio ha quattro sezioni: scienza dei materiali, circuiti a stato solido, dispositivi a microonde e laser. Impiega novecento persone, un terzo delle quali nella ricerca.

L'opera svolta da questo e da altri laboratori consimili è chiaramente espressa in tutta una serie di importanti pubblicazioni specializzate. C'è il « Notiziario di elettronica », edito dalla Società cinese di elettronica; la « Tecnologia elettronica » e il « Mondo elettronico », editi dalla Società elettronica di Shangai; il *Manuale dei dispositivi semiconduttori*, preparato nel 1971 in collaborazione dalla Comune di Hsu-wei a Shangai e dall'Università Chiao-Tung. Nel 1970 l'Editrice scientifica ha tradotto un classico notissimo negli USA, *Introduction to Large Scale Integration* di A. J. Khambata. Nel 1971 l'Editrice per l'industria della difesa nazionale ha tradotto un gran numero di articoli scientifici stranieri, raccogliendoli in un volume dal titolo *Integrazione su grande scala*. Piú recentemente hanno visto la luce in questo campo diversi libri originali, tra i quali *Circuiti integrati a microonde* e *Laser*. Del resto la Cina ha a disposizione quasi tutte le pubblicazioni occidentali: in occasione della visita all'Università Tsinghua di Pechino ho visto uno studente intento alla lettura di un recente numero della rivista americana « Applied Optics ».

Basta un breve elenco di taluni dispositivi e processi che compaiono nel *Manuale dei dispositivi semiconduttori* a dare un'idea, almeno allo specialista, della varietà di interessi degli studiosi cinesi. Tra i diodi gioverà ricordare quelli a punta di contatto, gli Zener, i raddrizzatori, quelli a capacitanza variabile, quelli a tunnel e i fotodiodi. Tra i transistor sono menzionati quelli a giunzione in lega, a giunzione diffusa, a monogiunzione e i MOSFET. I circuiti integrati comprendono gli elementi logici diodo-transistore, i logici transistore-transistore, gli amplificatori e gli elementi sia a schermo sottile sia a schermo normale.

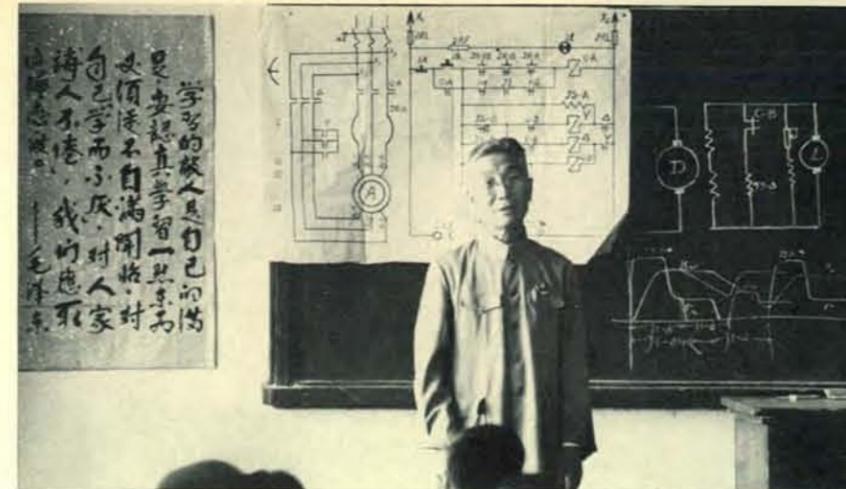
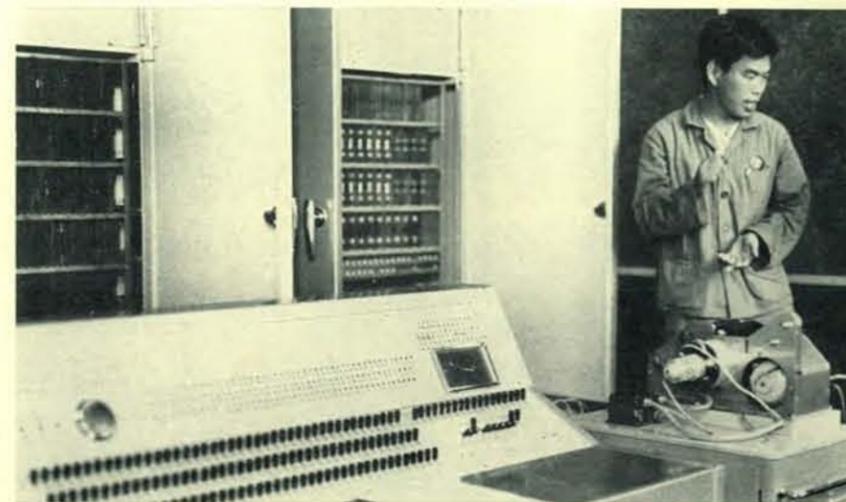
L'elemento logico diodo-transistore cinese sfrutta un metodo di confezionamento, messo a punto negli USA, noto con il nome di TO-5, mentre l'elemento transistore-transistore utilizza il cosiddetto « pacchetto piatto ». Vi è comunque motivo di ritenere che i cinesi abbiano addirittura superato questo stadio, passando probabilmente al piú veloce elemento logico a emettitore comune. Il transistore piano al silicio incorporato in molti di questi dispositivi ha una caratteristica di rumore di sette decibel a 400 megahertz, valore che regge bene il confronto con gli elementi disponibili negli USA.

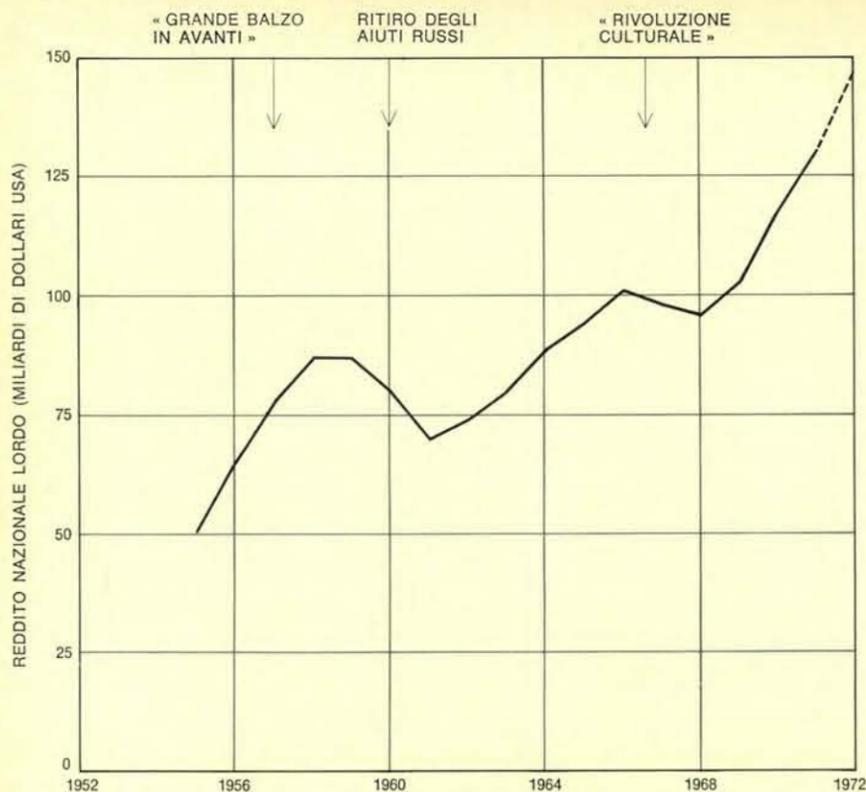
Non senza sorpresa ho constatato che, rispetto alle attività dell'Università Tsinghua, l'opera dell'Istituto per i semiconduttori è piú orientata alla ricerca di base. Il fatto è che le università (e persino le scuole medie superiori) si assumono in larga parte l'onere della fabbricazione vera e propria. Ho visitato, nell'Università Tsinghua, quella parte del grande edificio della facoltà di fisica dove si lavora ai circuiti integrati. Il vetrino che mi è stato mostrato al microscopio conteneva un circuito integrato a transistori bipolari: la ragazza che manipolava un saldatore a ultrasuoni collegò ben 10 cavetti al circuito in un minuto circa.

Tutta l'apparecchiatura per la produzione dei circuiti integrati, compreso il microscopio a fotoriduzione e il saldatore a ultrasuoni, era di fabbricazione cinese. Le lamine di silicio venivano ricavate da lingotti monocristallini realizzati da fabbriche specializzate quali lo Stabilimento monocristalli gestito dal Collegio pechinese di ingegneria. I crogioli in cui vengono realizzati questi grossi cristalli, crogioli del tipo Czochralski, sono fabbricati anch'essi in Cina. Il prodotto della lavorazione è un lingotto cristallino di tre chilogrammi, lungo sessanta centimetri e con cinque centimetri di sezione. A quanto sembra ogni officina (come quella della Tsinghua) che fabbrichi dispositivi a stato solido si occupa di stendere direttamente sulle lamine lo strato epitassiale di silicio.

I forni epitassiali vengono costruiti quasi tutti da una « fabbrica di quartiere » di Pechino, lo Stabilimento semiconduttori n. 1 del distretto occidentale. Lo stabilimento era stato organizzato nel 1958 (dalle casalinghe del quartiere, a quanto mi è stato detto) per la produzione di semplici bilance e di altri strumenti di misurazione. Nel 1965, per esaudire l'invito del governo, parte delle operaie dello stabilimento seguí un corso di specializzazione di due mesi presso l'Università Tsinghua per qualificarsi alla produzione dei forni. Attualmente si producono ogni anno, con l'impiego di 360 addetti, cento forni a diffusione e cento forni epitassiali. Si tratta di apparecchi con una uniformità termica spaziale di ± 1 °C e una stabilità di regolazione di ± 0,5 °C, caratteristiche che reggono ottimamente il confronto con quelle dei migliori forni di produzione occidentale.

Allo stabilimento mi è stato spiegato che nessuno degli addetti possiede un titolo superiore al diploma di scuola media. Mi è stato fatto notare infatti che, per gran parte delle mansioni tecniche, non è indispensabile l'istruzione superiore. È opportuno aggiungere che il diplomato di scuola media cinese, anche quando non intenda dedicarsi agli studi universitari in campo tecnico, ha già frequentato almeno un corso annuale di chimica, fisica, algebra, trigonometria, geometria e calcolo.

All'Università di Pechino i corsi di fisica sono piú avanzati rispetto a quelli dell'Università Tsinghua, poiché comprendono anche materie fondamentali dello stato solido, per esempio la fisica delle basse temperature. Comunque l'accento è sempre posto sull'applicazione, in perfetta armonia con il pensiero di Mao: « L'istruzione deve essere al servizio della politica proletaria e fondersi con il lavoro produttivo ». (Personalmente sono convinto che anche il fisico teorico non possa che trarre gran giovamento dal contatto con l'applicazione pratica. Ho pensato spesso, per esempio, che i fisici inglesi abbiano un certo margine di vantaggio sui colleghi americani, grazie alla maggior serietà del lavoro di laboratorio previsto dai programmi della scuola media britannica.) All'Università di Pechino insegna fisica l'eminente professor Hunag K'un, un fisico puro che è stato all'Università di Bristol e che, con Max Born, ha scritto *Dynamical Theory of Crystal Lattices*. Ho saputo da lui che è titolare di una cattedra di fisica dei semiconduttori, e si interessa principalmente a un impianto pilota nel quale venti laureati e cento tecnici lavorano sui circuiti integrati.

L'Università Chiao-Tung è un istituto di tecnologia che sorge a Sian, nella Cina nord-occidentale. Il docente di elettromeccanica sta spiegando i comandi elettrici. Sul manifesto (*a sinistra*) compaiono alcune citazioni di Mao: « Il maggior nemico del sapere è l'autocompiacimento » e « Lo studio serio comincia con l'insoddisfazione di se stessi ».

In un'aula universitaria si insegna l'impiego dell'elaboratore tipo 701. Il quadro di comando è in primo piano, le unità centrali di elaborazione si vedono in secondo piano.

Un'operaia provvede all'assemblaggio di un fotomoltiplicatore in un'officina universitaria. Oggi l'autosufficienza in questo settore è uno dei principali obiettivi della Cina.

Dalla Rivoluzione culturale il reddito nazionale lordo continua ad aumentare regolarmente. I dati, non comunicati ufficialmente dalla Cina, sono stati stimati da analisti esteri.

Dopo un netto calo delle iscrizioni verificatosi durante la rivoluzione culturale, il corpo studentesco dell'Università di Pechino va rapidamente aumentando. Il rettore dell'ateneo (piú esattamente indicato con il titolo di vice presidente del Comitato rivoluzionario universitario) è Chu P'ei-yuan, autore nel 1928 presso l'Istituto di Tecnologia della California di una tesi di laurea sulla simmetria nella teoria generale della relatività di Einstein. A suo avviso è opportuno che ogni docente sia tenuto a compiere anche il lavoro manuale, sia che si tratti semplicemente di dare una mano a curare l'orto dell'università, sia che si tratti di « unirsi agli operai » per imparare a conoscere le esigenze reali dell'industria (solitamente in attività non dissimili dal lavoro di consulenza che fanno molti professori americani). Chu ha messo in risalto la necessità di stabilire un chiaro rapporto tra problemi pratici e problemi della ricerca, atteggiamento che appare piú che ragionevole alla luce dell'attuale stadio dello sviluppo industriale cinese.

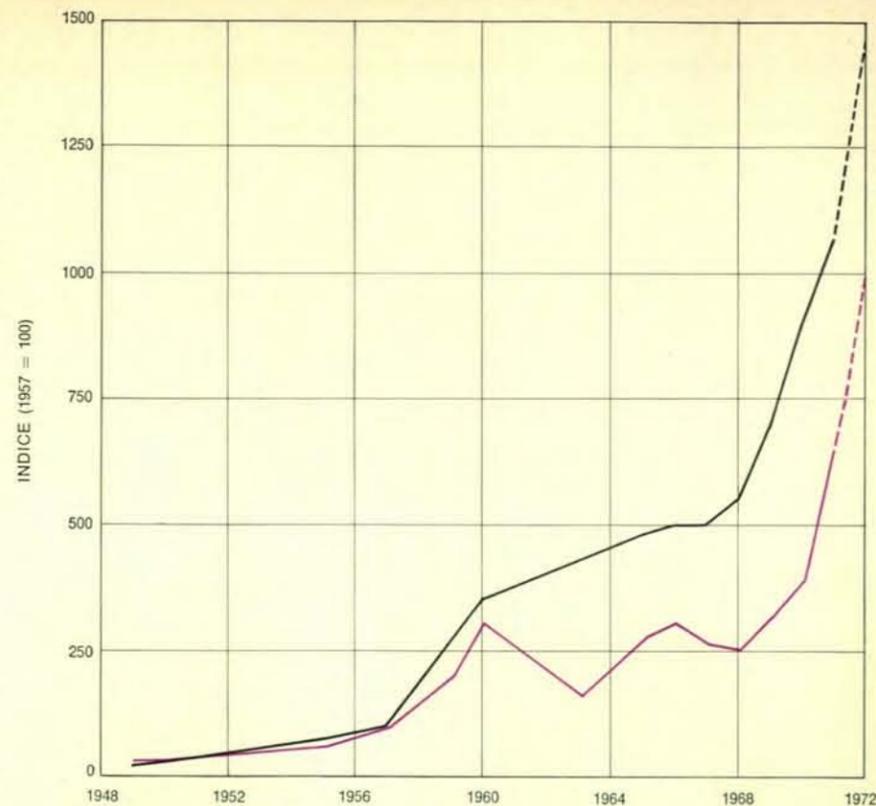
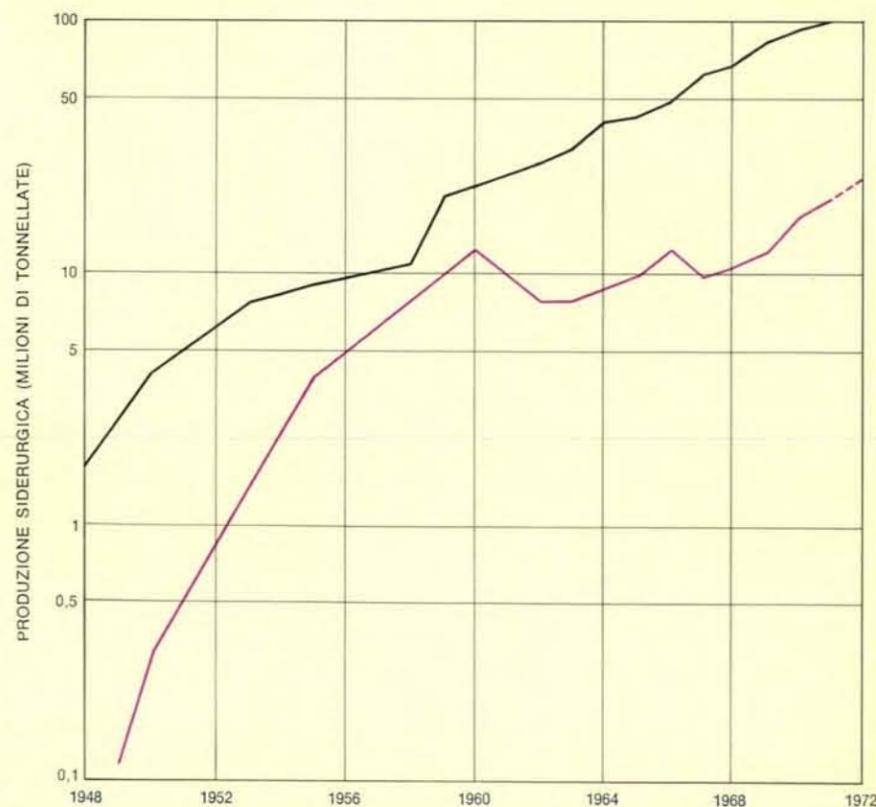
Premessa essenziale della tecnologia elettronica è la disponibilità di un'ampia gamma di strumenti sofisticati e di attrezzature di laboratorio specialistiche. Oggi anche questo corredo viene prodotto in Cina. Ho visto, per esempio, un contatore numerico da 100 megahertz, un oscilloscopio da 50 megahertz e un oscilloscopio campionatore con un tempo di aumento (in effetti un potere risolutivo dei tempi) di 44 picosecondi (trilionesimi di secondo). C'era poi un microscopio elettronico con una capacità di ingrandimento di 400 000 diametri e un potere risolutivo di sette angstrom. Mi è stato mostrato uno spettrografo con reticolo di diffrazione di due metri con potere risolutivo di otto angstrom per millimetro nel campo di lunghezze d'onda da 2000 a 10 000 angstrom, oltre a uno spettrografo di massa dotato di campo elettrico cilindrico e di campo magnetico costante. Sono rimasto particolarmente colpito da una pompa a ioni, impiegata per creare rapidissimamente il vuoto spinto, che è capace di lavorare alla portata di 14 000 litri al secondo. A titolo di confronto dirò che il miglior oscilloscopio campionatore di fabbricazione americana ha un tempo di aumento di 28 picosecondi, che i nostri spettrografi di massa sono solitamente dotati di obiettivo quadripolare e che, quando è necessario, le nostre pompe a ioni funzionano abbinate a una pompa a sublimazione di titanio, dispositivo che, a quanto mi è stato detto, in Cina non esiste. In genere, però, è difficile immaginare qualche strumento di ricerca tra i piú importanti che non sia fabbricato direttamente dai cinesi.

Ho esaminato diversi elaboratori elettronici. Quello dell'Istituto dei calcolatori dell'Accademia delle scienze è stato costruito sul posto nel 1968. Si tratta di un modello transistorizzato con le seguenti caratteristiche: tempo di accesso, due microsecondi; nuclei magnetici con diametro interno di 0,8 millimetri e diametro esterno di 1,2 millimetri; memoria principale di 32 000 parole e memoria a tamburo di 64 000 parole. (È quasi identico al modello DJS-6 presentato dai cinesi l'autunno scorso alla Mostra nazionale canadese di Toronto.) L'elemento d'ingresso del calcolatore è un lettore fotoelettrico a nastro di carta che riceve 1000 perforazioni al secondo. Il sistema di uscita comprende: una stampatrice rapida a 1200 righe al minuto e 15 caratteri per riga; una stampatrice a riga larga che lavora alla velocità di 300 righe al minuto e 160 caratteri per riga; un « tracciatore » a lastra che esegue passi da 0,25 millimetri alla velocità di 400 passi al secondo. Sempre a titolo di confronto, ricorderò che l'unità di memoria del nuovo modello 158 dell'IBM 370 sfrutterà nuclei MOSFET in luogo dei nuclei magnetici e sarà venti volte piú veloce di quella cinese. Non ho visto traccia né di unità di memoria a dischi né di time-sharing. Può darsi però che l'Istituto dei calcolatori non sia il luogo adatto per vedere gli elaboratori cinesi piú recenti giacché l'istituto, piú che di ricerca sui componenti, si occupa principalmente di sviluppo del software. Mi è stato detto che i tecnici cinesi sono attualmente impegnati in importanti programmi di integrazione su grande scala, incontrando piú o meno gli stessi problemi che abbiamo dovuto risolvere in occidente alcuni anni fa. La qualità relativamente mediocre di certi loro materiali, per esempio, ostacola il raggiungimento di rese sufficientemente elevate per la costruzione di unità di memoria piú perfezionate, nonostante l'alto livello della nuova tecnologia. Sembra però che sia in corso la realizzazione di una solida piattaforma che, nel giro di pochi anni, consentirà loro di padroneggiare l'arte dell'integrazione su grande scala.

In Cina la tecnologia dei semiconduttori è andata molto al di là del laboratorio e di un'industria elettronica angustamente interpretata. Sarebbe meglio parlare, anzi, di una rivoluzione elettronica in diversi campi. A Shangai, per esempio, la Comune della contea di Song-Ciang e il 29° Stabilimento radio hanno collaborato alla messa a

punto di un distruttore d'insetti portatile a raggi ultravioletti (lunghezza d'onda 3600 angstrom) da impiegarsi in agricoltura. È inoltre disponibile una trasmittente-ricevente con amplificatore, non piú grande di un comune libro, che può alimentare un altoparlante da 25 watt oppure 40 altoparlanti piú piccoli. I raddrizzatori al silicio già sono impiegati come elementi di comando nei forni elettrici siderurgici e per trasformare la corrente alternata in continua per la marcia di un treno elettrico di nuova realizzazione. Quanto alla tecnologia delle microonde, ho visto personalmente nello Stabilimento apparecchiature per le comunicazioni di Pechino, dove si fabbricano ripetitori di banda *S*, gli operai addetti alla fabbricazione di diodi Schottky al silicio e di amplificatori a onda progressiva, i quali realizzavano come al solito in proprio i film epitassiali.

Uno degli aspetti dell'industria cinese che piú mi hanno colpito è l'elevato grado di autonomia locale nello sviluppo tecnologico, pur secondo i criteri orientativi generali fissati dal governo. Anche negli USA i nostri grandi complessi fissano gli obiettivi globali presso la sede centrale, demandandone l'esecuzione alle varie direzioni e ai vari impianti locali, ma la differenza sta nel livello di complessità: un governo è costretto, rispetto a una grande azienda, a prendere in esame un maggior numero di fattori diversi.

Spesso gli osservatori stranieri fanno notare che in Cina l'industria sarebbe « squilibrata »: è ben vero, si suol dire, che i cinesi producono alcuni ottimi calcolatori, ma il Giappone costruisce dodici milioni di televisori l'anno, contro il mezzo milione della Cina. Tuttavia, come ho accennato in apertura, certi confronti sono privi di significato: è ovvio che la Cina non abbia una forte produzione di beni di consumo; è ovvio che il suo reddito pro capite sia ancora molto basso. Persino l'URSS, dopo cinquant'anni di industrializzazione, non riesce a far fronte efficacemente alla domanda di beni di consumo della popolazione. Il Giappone, terzo colosso industriale del mondo, ha ancora un reddito pro capite inferiore a quello della maggior parte dei paesi europei. Quando si considerino gli attuali bisogni e la particolare forma sociale della Cina, è giusto dire che lo sviluppo industriale del paese sia perfettamente « equilibrato ». Sviluppata la base scientifica di supporto alla tecnologia e impegnata la propria tecnologia nella propulsione di un rapido sviluppo industriale, la Cina è ormai sulla strada di diventare una potenza industriale avanzata.

Dopo la scoperta dei giacimenti di Ta Ching, la produzione di petrolio greggio (*in nero*) e di energia elettrica (*in colore*) è andata rapidamente aumentando. I dati per il 1957 erano due milioni di tonnellate di greggio e 15.5 miliardi di chilowattore di elettricità.

Confronto tra la produzione siderurgica cinese (*in colore*) e giapponese (*in nero*). Data la scala logaritmica, i tratti paralleli delle curve indicano uguali tassi di crescita.

La resistenza a trazione dei liquidi

Anche i liquidi, come i solidi, si stirano quando sono sottoposti a una sufficiente trazione. Questa resistenza alla trazione ha conseguenze importanti sia in natura sia in tecnologia

di Robert E. Apfel

Fra le varie proprietà della materia, una che normalmente non viene considerata nel caso dei liquidi è la resistenza a trazione. In un metallo, per esempio, tale proprietà può essere misurata sottoponendo semplicemente un provino del metallo stesso a una forte e continua trazione, e annotando la forza che è necessaria per rompere il provino stesso. È ben chiaro che non risulta possibile eseguire una misurazione di questo tipo con un liquido. Ciononostante rimane il fatto che i liquidi posseggono una certa resistenza alla trazione, e che essa può essere misurata. Per di piú, questa resistenza alla trazione ha notevoli conseguenze naturali e pratiche.

La resistenza a trazione dei liquidi può essere misurata mediante l'aiuto del concetto di pressione negativa, concetto che suona a prima vista piuttosto paradossale. Si consideri l'esperimento seguente, condotto dal chimico francese Marcellin Berthelot vissuto nel secolo scorso. Egli riempí un tubo di vetro sotto vuoto con dell'acqua del tutto esente da aria in soluzione, lasciando un piccolo spazio tra la superficie dell'acqua e la sommità del tubo. Scaldò poi gradualmente il tubo finché l'acqua si espanse tanto da riempirlo completamente. Contrariamente a quanto ci si potrebbe aspettare, quando lasciò raffreddare l'acqua, il tubo rimase dapprincipio pieno fino in cima. Poi, quando l'acqua si fu raffreddata ulteriormente fino a raggiungere una certa temperatura critica, essa si trasformò improvvisamente in vapore, producendo un suono chiaramente udibile. Il ragionamento di Berthelot fu che mentre il liquido si raffreddava esso era sottoposto a una pressione negativa, cioè era sotto sforzo di trazione. Quando il liquido raggiunse il limite della sua resistenza a trazione, si « frantumò » in un gas. Dai suoi esperimenti Berthelot ricavò una stima del massimo valore della pressione negativa per l'acqua, che risultò compreso fra –30 e –50 atmosfere. (Una atmosfera metrica è equivalente alla pressione di un chilogrammo per centimetro quadrato.)

Un esperimento consimile è riprodotto talvolta dalla natura: nei minerali ci sono delle piccolissime cavità piene d'acqua e di vapore acqueo. Edwin W. Roedder dell'US Geological Survey ha osservato che facendo gelare l'acqua in una cavità di questo tipo si elimina il vapore perché l'acqua gelata occupa un volume maggiore di quella liquida. Egli scoprí che quando si permette al ghiaccio di fondere parzialmente, non si ricostituisce il vapore, come ci si potrebbe attendere. In effetti si può riscaldare l'acqua nella cavità fino a piú di 6,5 gradi Celsius, producendo cosí una pressione negativa che viene valutata intorno a –1000 atmosfere, prima che appaiano bolle di vapore.

Un cilindro e un pistone rappresentano il metodo teorico ideale per provare la resistenza a trazione di un liquido. Il cilindro è parzialmente riempito con il liquido e il pistone è a contatto con esso su tutta la sua superficie (*1*). Alla pressione interna normale, cioè idrostatica, del liquido le molecole (*punti neri*) mantengono una certa distanza media fra loro e sono tenute insieme dall'attrazione coesiva reciproca (*colore*). Il liquido è messo sotto sforzo tirando lentamente il pistone verso l'alto (*2*). Se il liquido aderisce abbastanza bene alla testa del pistone, il suo volume aumenta un po' allorché la trazione esercitata sul pistone incrementa la spaziatura delle molecole vincendo la forza di coesione. Se la trazione supera la pressione atmosferica, il liquido sarà a una pressione negativa. Quando esso raggiunge il limite della sua resistenza (cioè quando la trazione esercitata sul pistone supera la forza di coesione fra le molecole), si separa spontaneamente nelle due fasi liquido e vapore (*3*).

Le pressioni negative hanno una funzione importante nelle colonne di liquido linfatico che trasportano l'acqua dalle radici alle foglie degli alberi piú alti. L'evaporazione dell'acqua dalla superficie delle foglie provoca una trazione sulla linfa per tutta l'altezza dell'albero. Una pompa a vuoto non è in grado di aspirare una colonna d'acqua per una altezza superiore a 10 metri, che corrisponde alla pressione di una atmosfera. Dal momento che moltissimi alberi sono piú alti di 10 metri, risulta evidente l'intervento di una pressione negativa nella colonna che trasporta la linfa.

La tecnica può utilizzare vantaggiosamente le pressioni negative in diversi modi. Per esempio, Alan Hayward del British Government Scientific Service ha dimostrato che è possibile costruire una semplice pompa a pressione negativa molto simile a quella naturale. Sebbene la pompa presenti una scarsa efficienza, con alcune modifiche potrebbe rivelarsi di notevole utilità nelle regioni sottosviluppate per estrarre l'acqua da falde profonde. Lo strumento, chiamato galvanostalometro, è un manometro a tensione (misuratore di pressione) che viene usato nelle ricerche elettrochimiche come indicatore estremamente sensibile del primo apparire di bolle di gas in un liquido. Nella camera a bolle usata dai fisici delle alte energie i percorsi delle particelle subatomiche vengono tracciati dalle bollicine che esse producono quando attraversano un liquido riscaldato al di sopra del suo normale punto di ebollizione oppure soggetto a uno sforzo di trazione. I suoni di elevata intensità producono in un liquido brevi impulsi di tensione che possono portare alla formazione di bollicine sovente utilizzate per aiutare i solventi nell'opera di pulizia. Tali bollicine possono anche agire da catalizzatore in certe reazioni chimiche.

Si danno anche problemi pratici inerenti la cavitazione nei liquidi sottoposti a sforzi di trazione. Per esempio le cavità che si formano nell'acqua intorno alle eliche o nelle turbine idrau-

La superficie dell'acqua è lacerata da una sfera di acciaio che ruota su se stessa lasciata cadere da un'altezza di 3 metri in un recipiente. Quando la sfera penetra nell'acqua, si muove troppo velocemente perché il liquido possa scorrere dolcemente intorno a essa: l'acqua si squarcia formando una cavità che circonda la sfera fino a quando si stabilisce un flusso idrodinamico. L'esperimento è stato compiuto da G. G. Mosteller in un recipiente con una parete di vetro. Una macchina fotografica a lastra, con l'otturatore aperto, era focalizzata sul recipiente in una camera oscura. La sfera, prima di entrare nel recipiente, interrompeva un raggio di luce diretto su una cellula fotoelettrica, comandando in tal modo una lampada a microflash. L'intenso lampo di luce, diretto sulla sfera per circa due microsecondi, impressionava sulla lastra fotografica la posizione della sfera e le caratteristiche della cavità prodotta dal suo passaggio.

liche, possono ridurre l'efficienza di queste apparecchiature. La trasmissione di segnali sonar a lunga distanza richiede suoni ad alta intensità e pertanto la trasmissione stessa può essere compromessa dalle bollicine che talvolta si formano sulla superficie dell'organo trasmittente oppure immediatamente di fronte a esso.

Fin dai tempi di Berthelot sono state sviluppate diverse tecniche per misurare la resistenza a trazione dei liquidi. Nella maggior parte di tali procedimenti i risultati vengono a dipendere in maniera preponderante dal modo in cui il campione di liquido è stato preparato. Questo fatto suggerisce che qualcosa di estraneo al liquido puro influenzi il processo mediante il quale le cavità si formano nel liquido. Per ridurre significativamente tali influenze, una particolare diligenza è stata posta, in sperimentazioni recenti, nell'evitare contaminazioni del campione liquido con impurezze solide sospese, o piccole particelle, e nel mantenere il campione non a contatto con le pareti del contenitore. Poiché inoltre può darsi che particelle subatomiche inducano cavitazione nei liquidi sottoposti a sforzi di trazione, cosí come avviene nella camera a bolle, in certi esperimenti si è dovuto provvedere a una schermatura contro le radiazioni.

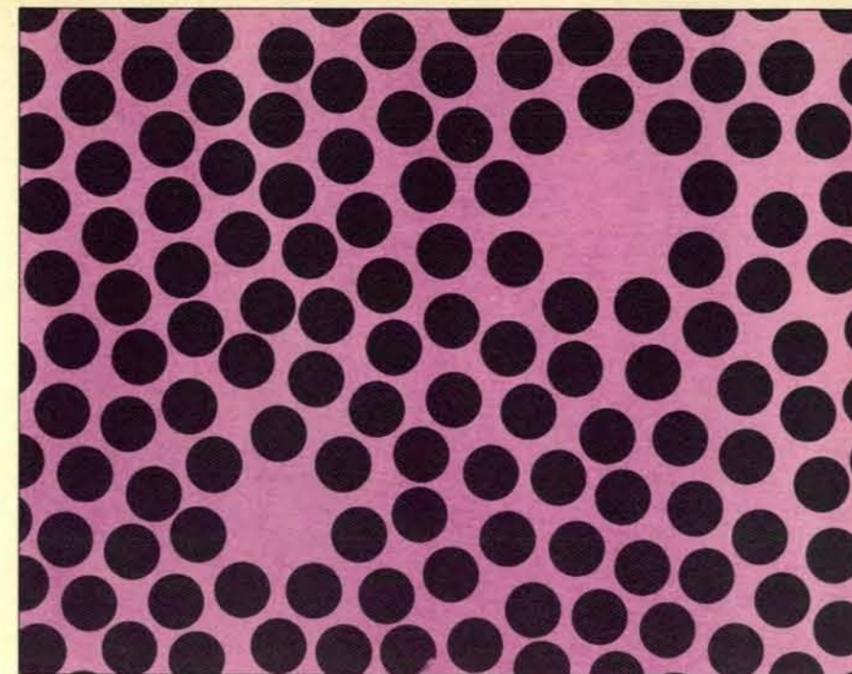
Per comprendere il processo di cavitazione è necessario studiare le condizioni per le quali la fase vapore e la fase liquida di una determinata sostanza possono coesistere. La pressione di equilibrio sulla interfaccia che separa la fase liquida dalla fase vapore di una sostanza è chiamata tensione di vapore. L'equilibrio è essenzialmente dinamico nel senso che in un determinato tempo è uguale il numero delle molecole che condensano nel liquido e quello delle molecole che dal liquido evaporano. La tensione di vapore varia con la temperatura. Per esempio la tensione di vapore dell'acqua è uguale alla pressione atmosferica al punto di ebollizione di 100 °C ed è uguale a circa 0,025 atmosfere alla temperatura ambiente normale di 23 °C. La curva che descrive la dipendenza dalla temperatura è detta curva di equilibrio; agli stati di temperatura e di pressione definiti da questa linea, il liquido può coesistere in equilibrio con il suo vapore, attraverso una interfaccia fisica (*si veda la figura in basso nella pagina a fronte*).

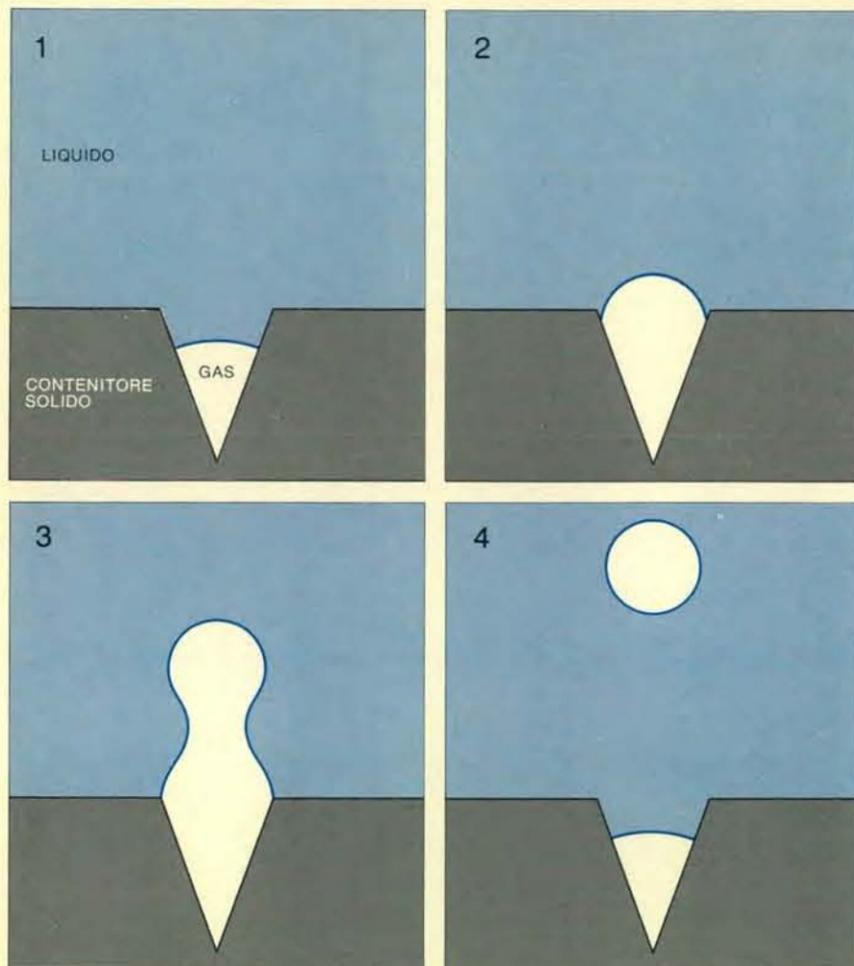
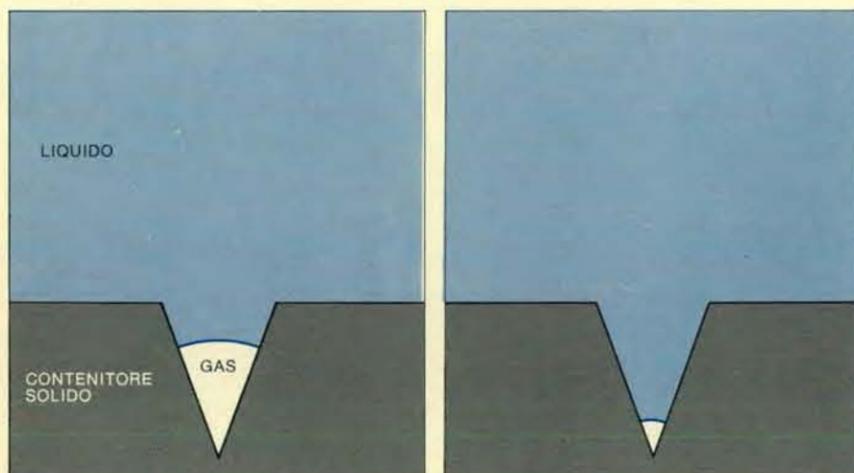
In assenza di una interfaccia piana liquido-vapore, la sola via per la quale in seno a un liquido si può formare del vapore è sotto forma di cavità. In tal modo si può distinguere fra due differenti tipi di vaporizzazione. Il primo tipo è rappresentato dall'evaporazione da una interfaccia liquido-vapore, per esempio quando il vapore si sviluppa da una superficie di acqua bollente. Il secondo tipo è rappresentto dalla cavitazione, per esempio quando bollicine di vapore si sviluppano all'interno di acqua bollente. Nel secondo caso è chiaro che si forma un nuovo tipo di interfaccia.

Le interfacce sono caratterizzate dalle proprietà della tensione superficiale. Si consideri una immaginaria superficie piana e orizzontale all'interno di un liquido. Ciascuna molecola che si trova su quella superficie viene attratta in eguale modo dalle molecole che si trovano da entrambe le parti della superficie stessa. Se tutto il liquido che si trova al disopra della superficie immaginaria viene rimosso e sostituito con vapore, le molecole che si trovano sulla superficie risultano sottoposte a forze sbilanciate; esse verranno certamente attratte piú fortemente dalle molecole del liquido e, se uno stato di equilibrio deve essere mantenuto, parecchie di esse si precipiteranno in seno al liquido sottostante. La superficie viene in un certo qual modo esaurita, e lasciata in uno stato contratto, piú o meno come quello di una membrana elastica stirata. L'analogia è però molto limitata. L'interfaccia è uno stato di transizione, di spessore finito (generalmente poche molecole), fra la fase liquida e la fase vapore. Se l'area della superficie liquida venisse aumentata, la risultante interfaccia piú estesa avrebbe lo stesso numero di molecole per unità di area della superficie piú piccola, dalla quale ha avuto origine. Nel formare la interfaccia piú estesa, delle molecole devono emigrare dall'interno del liquido verso la superficie, contro forze non contrastate e dirette verso il liquido. La definizione termodinamica della tensione superficiale corrisponde al lavoro svolto contro queste forze per formare una unità di area di nuova superficie. L'approccio termodinamico alla tensione superficiale è largamente dovuto al classico lavoro di Josiah Willard Gibbs nell'ultimo scorcio del secolo scorso. L'approccio è determinante per comprendere non solo la cavitazione ma anche fenomeni a essa collegati, per esempio la formazione di goccioline liquide in vapori soprassaturi o la solidificazione di liquidi sottoraffreddati.

Le interfacce sono caratterizzate dalla proprietà della tensione superficiale. In una immaginaria superficie piana orizzontale all'interno di un liquido (*a sinistra*) le molecole (*punti*) che stanno sulla superficie sono attratte in egual misura dalle molecole che stanno dalle due parti opposte della superficie. Se si toglie tutto il liquido al di sopra della superficie e lo si sostituisce con un gas (*a destra*), le molecole che stanno sulla superficie saranno attratte piú fortemente dalle molecole del liquido. Se si deve conservare l'equilibrio, le molecole devono essere spinte nel liquido, lasciando uno strato superficiale piú rarefatto.

Poiché per la formazione della nuova interfaccia di una cavità è necessario del lavoro, il liquido può essere soggetto a pressioni inferiori a quella della tensione di vapore, senza che vi sia evaporazione. Si può sovraespandere il liquido riducendo la pressione in esso al di sotto della tensione di vapore, addirittura fino a pressioni negative, finché il liquido raggiunge il limite della sua resistenza a trazione e si spezza, ovvero vaporizza. In modo analogo si può surriscaldare un liquido, innalzando la sua temperatura al di sopra del normale punto di ebollizione, fino a che il liquido raggiunge il suo limite di surriscaldamento e vaporizza improvvisamente. Qualunque processo si scelga (riscaldare il liquido, ridurre la sua pressione interna, ovvero entrambe le cose assieme), se la sostanza in esame rimane liquida in uno stato di temperatura e pressione che normalmente andrebbe attribuito al vapore, si dice che essa è in uno stato metastabile. Il limite di sopravvivenza dello stato metastabile rappresenta la massima resistenza a trazione del liquido.

Una cavità sferica di vapore è in equilibrio se le forze dirette verso il suo esterno, tutte applicate sull'interfaccia della cavità, sono egualmente bilanciate. Le forze dirette verso l'interno sono la somma della pressione del liquido e della tensione superficiale per unità di area; la forza diretta verso l'esterno è la forza totale, sempre per unità di area, dovuta alle molecole di vapore presenti nella cavità che urtano contro l'interfaccia liquida. L'equilibrio meccanico della cavità presa in considerazione, che corrisponde alla cavità di dimensioni critiche, risulta instabile, poiché la tensione superficiale diretta verso l'interno cresce con il diminuire delle dimensioni della cavità. Se la cavità presenta dimensioni inferiori alle dimensioni critiche, la tensione superficiale diretta verso l'interno aumenterà fino al punto di distruggere l'equilibrio, causando il collasso e la scomparsa della cavità. D'altra parte, se la cavità risulta leggermente piú grossa, la tensione superficiale diminuisce; la cavità si ingrandirà quindi fino a dimensioni macroscopiche, finché la pressione e la temperatura del liquido attorno alla cavità, nonché la pressione del vapore all'interno, rimarranno costanti.

La densità delle molecole in un liquido non è costante; le molecole (*punti*) vibrano avanti e indietro circa 10^{13} volte al secondo, producendo cosí delle momentanee fluttuazioni localizzate nella densità del liquido. Le fluttuazioni si manifestano sotto forma di piccole cavità di vapore che vengono continuamente create e distrutte. Due di queste cavità sono illustrate come spazi fra molecole piú ampie del normale. Quando si aumenta la temperatura del liquido o si diminuisce la pressione, o si fanno entrambe le cose, le cavità aumentano in numero e dimensioni finché una di esse riesce a raggiungere le dimensioni critiche e infine causare la separazione del liquido in vapore.

Il diagramma delle fasi mostra gli stati (solido, liquido o vapore) in cui una sostanza normalmente si trova per diversi valori della temperatura e della pressione. Il liquido e il vapore possono coesistere in equilibrio sul tratto della curva (chiamata linea di equilibrio) che separa la fase liquida dalla fase vapore. In certe circostanze la sostanza può essere alla temperatura e alla pressione proprie di una regione presentandosi tuttavia sotto una forma relativa a un'altra regione. Per esempio, una sostanza nello stato *b* di pressione e temperatura dovrebbe essere normalmente un vapore. Se tuttavia dallo stato liquido *a* riduciamo lentamente la pressione a un valore negativo, lo stato *b* risultante si trova sotto la linea di equilibrio ma la sostanza mantiene il suo stato liquido. Un liquido di questo tipo è sovraespanso. In modo del tutto analogo un liquido può essere riscaldato lentamente da *c* a *b*, attraversando ancora la linea di equilibrio senza vaporizzare. Un liquido di questo tipo è surriscaldato. Qualunque percorso si segua nell'attraversare la linea, un liquido nello stato *b* è detto metastabile.

Le piccole fenditure nelle pareti del contenitore possono intrappolare del vapore o del gas estraneo (*1*), riducendo così la resistenza a trazione del liquido nel contenitore. Quando il liquido è sottoposto a una pressione negativa, l'interfaccia gas-liquido viene spinta fuori dalla fenditura (*2*), cresce (*3*), ed eventualmente si spezza per formare una cavità nel liquido (*4*). Pressioni negative maggiori provocheranno una crescita della cavità nel liquido fino a dimensioni più grandi ed eventualmente anche osservabili.

Un liquido può essere rinforzato con l'applicazione di una elevata pressione positiva prima di compiere l'esperimento della resistenza a trazione. In questo caso la primitiva interfaccia liquido-gas (*a sinistra*) viene forzata in profondità nella fenditura (*a destra*), e il gas diffonde lentamente attraverso l'interfaccia e si scioglie nel liquido. La sacca di gas si ritira. Dopo la pre-pressurizzazione è necessaria una maggiore pressione negativa per spingere l'interfaccia fuori della fenditura a formare una cavità.

Come può formarsi una cavità di dimensioni critiche, in un liquido che non presenti cavità preesistenti? Una risposta può essere data dalla cosiddetta teoria della nucleazione omogenea. La nucleazione omogenea si presenta quando in seno al liquido puro si verifica l'apparizione di embrioni di fase vapore. La teoria, avanzata nel 1937 da W. Döring, fa l'ipotesi che, se si potesse mettere a fuoco un ipotetico microscopio fino a livello molecolare, si potrebbe osservare che il liquido si trova in uno stato fortemente dinamico. Le molecole vibrano avanti e indietro circa 10^{13} volte al secondo: così facendo, esse creano delle fluttuazioni locali nella densità del liquido. Su scala molecolare, le fluttuazioni di densità si manifestano come minutissimi spazi vuoti, ovvero cavità di vapore, che sono continuamente formate e distrutte dal moto delle molecole. Se la temperatura viene aumentata, o la pressione viene diminuita, ovvero accadono entrambi i processi, le cavità aumentano sia in numero sia in dimensioni, come potrebbe rivelare una istantanea scattata con l'ipotetico microscopio di cui prima si è parlato. A una certa coppia di valori di pressione e di temperatura, esiste la ragionevole probabilità che in un determinato volume di liquido e in un determinato tempo le fluttuazioni di densità conducano alla formazione di una cavità di dimensioni critiche.

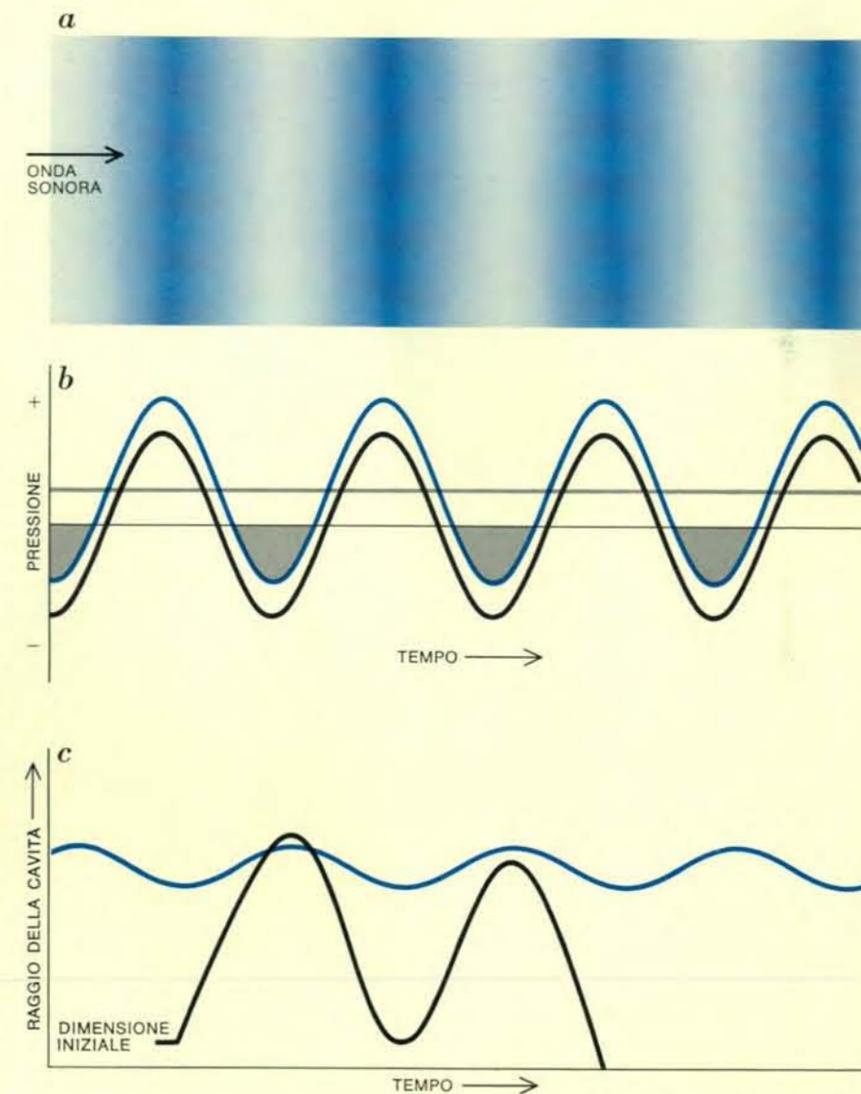
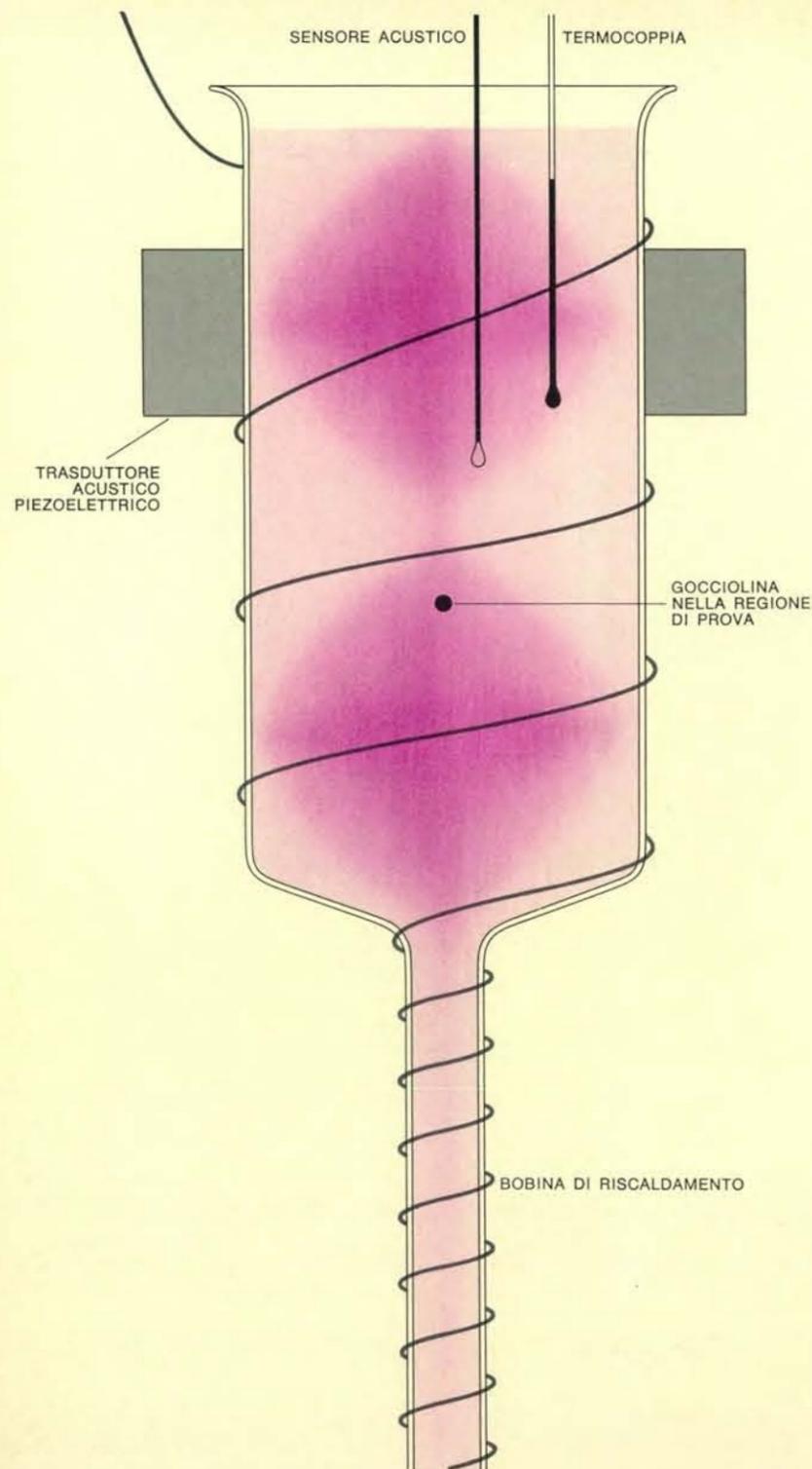
Poiché le cavità si trovano in equilibrio meccanico instabile, per un innalzamento infinitesimo della temperatura, o per un abbassamento infinitesimo della pressione, esse possono crescere fino a dimensioni macroscopiche. I valori limite di temperatura e pressione richiesti per produrre una cavità di dimensione critica determinano la massima resistenza a trazione del liquido. Questi stati limite di temperatura e pressione dipendono in parte anche dal tempo di attesa stabilito per l'esperimento; quanto più a lungo aspettiamo, tanto maggiore risulta la probabilità che si verifichi una fluttuazione di densità tale da produrre una cavità della dimensione critica. Per quanto riguarda il calcolo della resistenza a trazione, tuttavia, l'effetto risulta modesto: un aumento di un milione di volte nel periodo di attesa dà luogo a una diminuzione del 10 per cento soltanto nella resistenza a trazione prevista. Per l'acqua a temperatura ambiente la resistenza teorica oscilla fra –1300 e –1500 atmosfere. In questo caso la dimensione critica di una cavità corrisponde a un raggio di circa 10 angstrom (cioè a 10^{-7} centimetri).

Al crescere della temperatura la resistenza a trazione prevista si abbassa fino a raggiungere lo zero al limite di surriscaldamento dell'acqua, cioè a circa 300 °C, corrispondenti a un raggio critico di circa 50 angstrom. Se nel campione di liquido ci sono cavità di vapore o bolle di gas più grandi delle dimensioni critiche, la resistenza a trazione apparente di quel particolare campione è determinata dalla più grande cavità o bolla esistente al suo interno. Perciò se non si pone una cura estrema nell'eliminare tutte le possibili sorgenti di impurità del campione, è del tutto improbabile che si possa osservare la nucleazione omogenea.

Consideriamo ora ciò che succede a un liquido contenuto in un cilindro, che viene sottoposto a una forte trazione per mezzo di un pistone a perfetta tenuta nel cilindro stesso. Il liquido si frantumerà in vapore in una di queste due posizioni: o all'interno del liquido stesso oppure sulla superficie di separazione tra il liquido e la parete del cilindro o la testa del pistone. La cavità si creerà spontaneamente e in modo improvviso. Se spingiamo verso l'interno il pistone, facendo nuovamente condensare il vapore nel liquido, e poi lo tiriamo ancora verso l'esterno, con tutta probabilità le cavità si formeranno negli stessi posti dove già prima si erano formate. Possiamo osservare lo stesso fenomeno a casa nostra: il flusso di bolle proviene da certe zone particolari del fondo di una pentola di acqua bollente o delle pareti di una bottiglia di bevanda gassata. Se si potessero eliminare queste zone di cavitazione, la resistenza a trazione del liquido sarebbe incrementata.

Possiamo eliminare le zone di cavitazione applicando al liquido una elevata pressione positiva, all'incirca di +1000 atmosfere, per circa 15 minuti; quando si elimina la pressione positiva e si estrae il pistone, il liquido può sopportare un maggiore sforzo di trazione prima di entrare in cavitazione. E. Newton Harvey e i suoi colleghi dell'Università di Princeton hanno osservato un effetto del tutto simile riguardo al punto di ebollizione dell'acqua: quando l'acqua è stata prima sottoposta a una elevata pressione positiva e poi riportata alla pressione atmosferica, essa non raggiunge l'ebollizione che a una temperatura maggiore di 202 °C; a questo punto l'intero campione vaporizza con violenza esplosiva. Tali effetti della pre-pressurizzazione implicano che i liquidi hanno memoria: essi « sanno » di essere stati precedentemente pressurizzati.

La spiegazione di questo comportamento sta nelle superfici solide a contatto del liquido. Un esame microscopico dei contenitori e delle particelle in sospensione mostrerebbe che le superfici di questi solidi non sono lisce ma presentano molte piccolissime fessure e fenditure nelle quali possono essere intrappolate sacche di gas. Diversamente da una cavità libera, che dovrà crescere o collassare in seno al liquido, in certe condizioni la sacca di gas gode di una esistenza stabile nella fessura. Queste condizioni dipendono non solo dalle proprietà del liquido ma anche dalle dimensioni e dalla forma della fessura e dalla capacità del liquido di bagnare il solido.

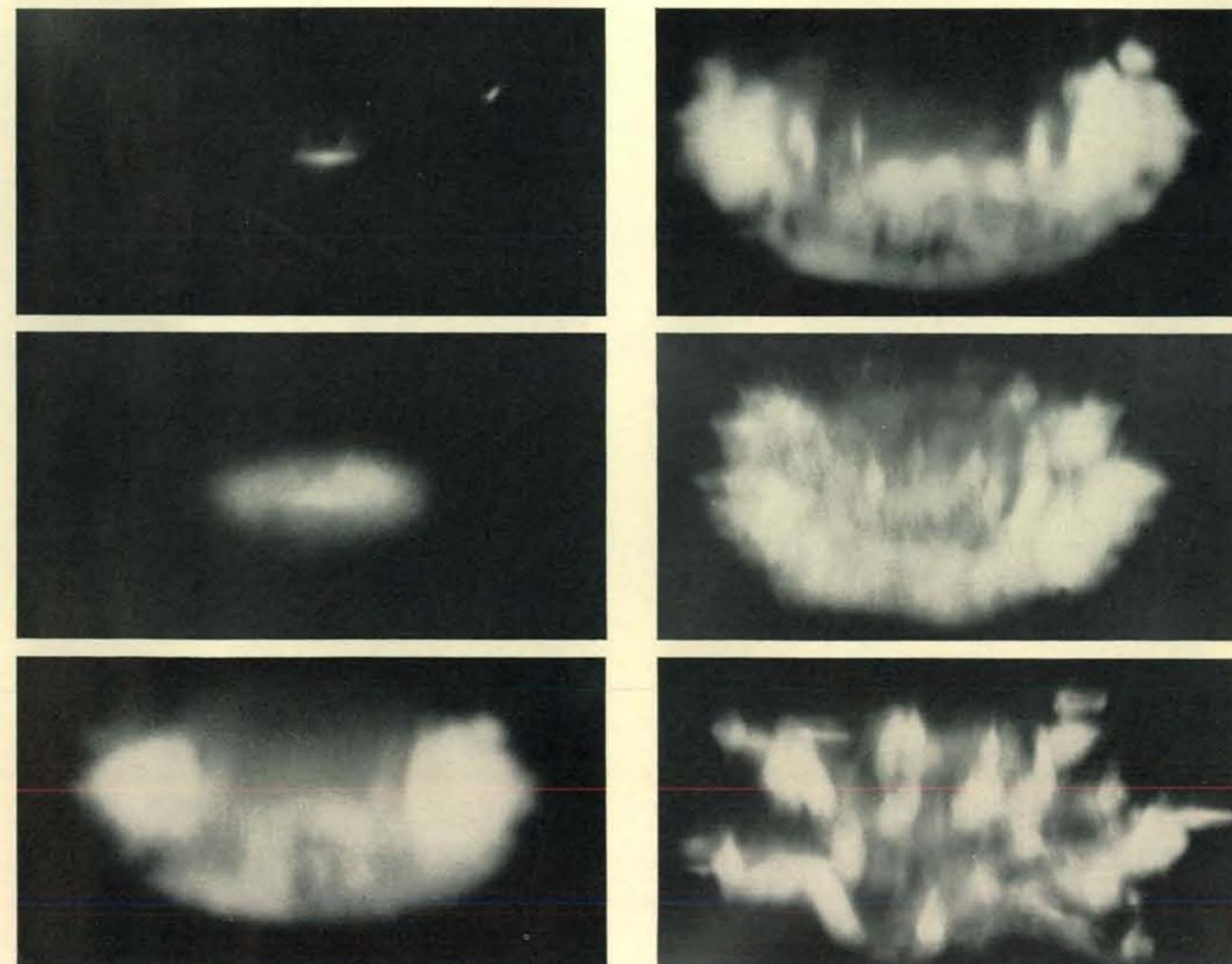
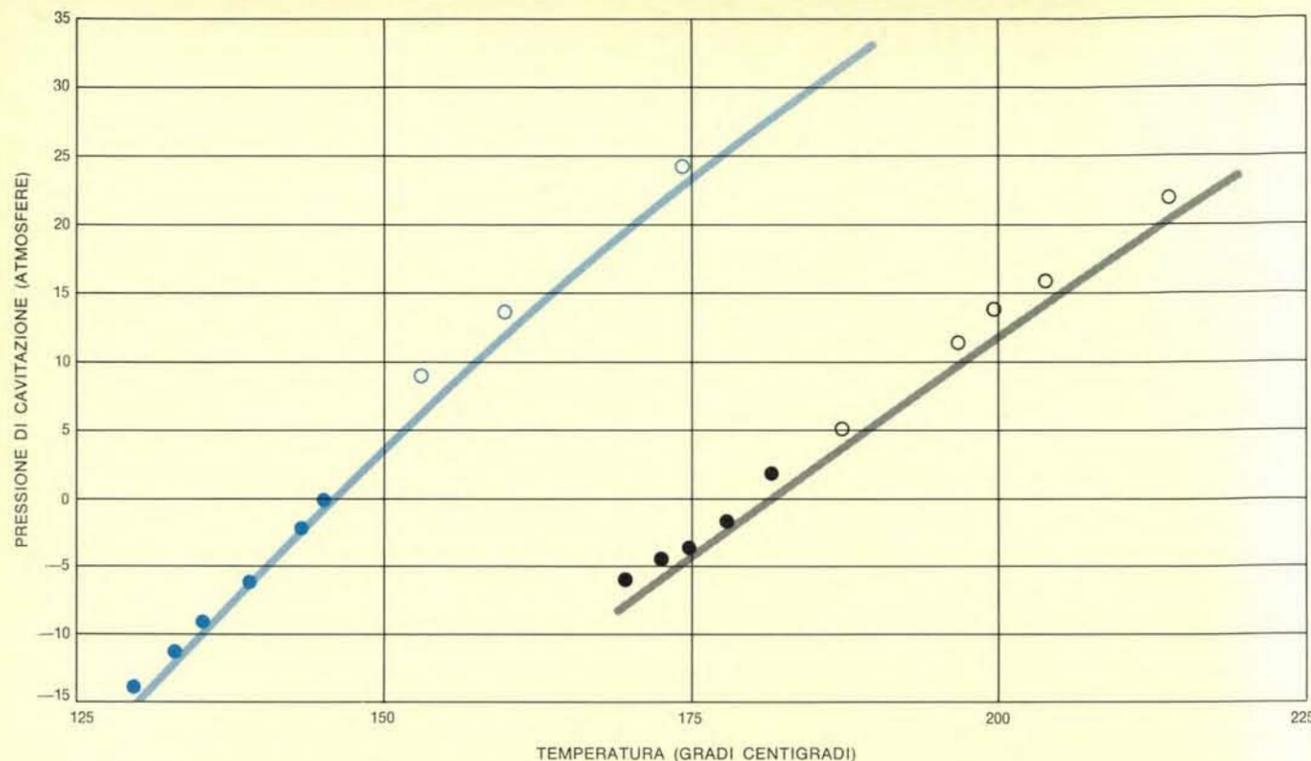
Partendo da questi dati è facile comprendere in che modo la pre-pressurizzazione possa influire sulla apparente resistenza a trazione di un liquido. Se il liquido non è stato pre-pressurizzato, quando si riduce la pressione esso può anche raggiungere un certo sforzo di trazione critico per il quale

Onde sonore ad alta intensità producono in un liquido un notevole sforzo periodico (*a*). Le onde sonore sono onde longitudinali che generano regioni di alta pressione (*colore scuro*) e di bassa pressione (*colore chiaro*). In ogni punto del liquido in un certo istante (*b*) la pressione assoluta (*in colore*) è la somma della pressione idrostatica (*in grigio*) e della pressione acustica istantanea (*in nero*). Per un tratto del mezzo ciclo acustico a bassa pressione la pressione acustica nel liquido può essere negativa (*zone grige*). Una cavità può crescere in risposta a questa pressione negativa (*c*); essa può essere una cavità di vapore (*nero*) o una bolla di un gas precedentemente disciolto nel campione (*colore*). La crescita della cavità di vapore è limitata dal fatto che la fase di pressione negativa è di durata limitata ed è seguita da una fase di pressione positiva. Il collasso della cavità di vapore dà spesso luogo a nuove cavità che ripetono il processo. Una bolla di gas è generalmente più stabile di una bolla di vapore; le sue dimensioni oscillano poco in risposta alla pressione acustica variabile e può quindi durare parecchie migliaia di cicli acustici, mentre una cavità di vapore collassa dopo pochi cicli.

Una colonna di vetro riempita con glicerina filtrata era una parte dell'apparato dell'autore per la misura della resistenza a trazione di liquidi surriscaldati. Una gocciolina di etere o di *n*-esano veniva introdotta dal basso nel tubo piccolo. Mentre la gocciolina risaliva attraverso la glicerina, veniva lentamente riscaldata finché, quando raggiungeva la regione di prova, era completamente nello stato surriscaldato. Un trasduttore acustico piezoelettrico stabiliva nella colonna di vetro un campo di onde sonore stazionarie di alta intensità (*colore*). Un sensore acustico dimostrava che la pressione acustica scemava radialmente dal centro della colonna verso l'esterno e che variava anche ciclicamente lungo l'asse della colonna. Quando l'intensità della pressione acustica veniva incrementata fino a un certo valore, la gocciolina in ascesa si fermava in un punto appena al di sopra di uno dei massimi della pressione acustica lungo l'asse della colonna. Quando la pressione veniva ulteriormente incrementata, la gocciolina si spostava un po' più vicino al massimo della pressione. Per una pressione abbastanza elevata la gocciolina raggiungeva il limite della sua resistenza ed esplodeva in vapore.

la pressione interna della sacca di gas e la pressione negativa nel liquido possono superare la tensione superficiale diretta verso l'interno. L'interfaccia tra gas e liquido si sposta allora fuori della fessura e si rompe per formare una cavità libera. Se il liquido è pre-pressurizzato, l'interfaccia è forzata profondamente all'interno della fessura e il gas intrappolato diffonde attraverso essa in seno al liquido. Quando poi si riduce la pressione per misurare la resistenza a trazione, la sacca di gas risulta piú piccola di prima della pre-pressurizzazione. È necessario dunque uno sforzo di trazione maggiore per superare la tensione superficiale diretta verso l'interno e provocare la crescita di una cavità dalla fessura.

Un cilindro e un pistone sono l'esempio adatto per discutere dal punto di vista teorico la cavitazione, ma risultano molto poco pratici per condurre esperimenti, soprattutto perché è difficile evitare la formazione di cavità di vapore nella piccola fessura che sempre esiste fra la parete del cilindro e quella del pistone. Un altro metodo per ottenere grandi sforzi di trazione nei liquidi fu messo a punto da Lyman J. Briggs del National Bureau of Standards. Egli riempí un tubo capillare a forma di *Z* con il liquido in esame, e montò il capillare su un meccanismo rotante. Quest'ultimo ruotava a una velocità angolare tale da causare cavitazione nel liquido al centro del capillare, punto che risultava soggetto al massimo sforzo di trazione. Nel dispositivo di Briggs un campione di acqua pura giunse a sostenere uno sforzo di trazione corrispondente a –277 atmosfere a 10 °C, valore piú alto registrato per quanto riguarda la resistenza a trazione dell'acqua pura, ma tuttavia inferiore alle previsioni teoriche di almeno cinque volte. Per di piú, si può verosimilmente supporre che l'effettivo luogo della cavitazione fosse l'interfaccia fra il capillare e l'acqua, e non l'interno del campione d'acqua.

Per evitare effetti indesiderati dovuti alle superfici solide del contenitore, lo sforzo di trazione deve in qualche modo essere esercitato in regioni spaziali sufficientemente distanti da queste. Un metodo per ottenere tale risultato consiste nel focalizzare onde sonore ad alta intensità in certe regioni all'interno del liquido, generando in esso sforzi alternati. Mentre un'onda sonora si propaga oltre un certo punto del liquido, la pressione in quel punto varia alternativamente da una pressione piú grande di quella idrostatica (la pressione interna del liquido a riposo) a una pressione inferiore a quella idrostatica. Durante qualsiasi frazione del ciclo acustico, la pressione assoluta nel liquido equivarrà alla somma della pressione idrostatica e della pressione acustica istantanea. Per una parte della metà a pressione inferiore del ciclo acustico, la pressione assoluta nel liquido può presentarsi negativa (*si veda la figura a pag. 21*); durante questa fase di pressione negativa può verificarsi la formazione di cavità.

La resistenza a trazione misurata per mezzo di onde sonore viene chiamata soglia della cavitazione acustica. Un fenomeno di cavitazione acustica in un liquido molto al di sotto del suo punto di ebollizione è spesso osservato come un rapidissimo allontanarsi della cavità dal punto di massimo sforzo acustico. Dato inoltre che la pressione negativa è di durata limitatissima, ed è sempre seguita dalla fase positiva del ciclo, la cavità ha vita brevissima. Un suono improvviso, accompagnato da un'onda d'urto prodotta durante il violento collasso della cavità, è associato alla scomparsa della cavità stessa. La soglia di cavitazione acustica può risultare piú grande della resistenza a trazione misurata con metodi statici; non soltanto la cavità si deve formare durante il breve periodo di sforzo di trazione, ma essa deve anche crescere in maniera significativa fintantoché la pressione rimane negativa. Se la cavità non cresce a sufficienza, può completamente collassare durante la fase positiva del ciclo acustico, prima ancora che sia diventata grande abbastanza da poter essere osservata. Pertanto, se si deve osservare un fenomeno di cavitazione, occorre impiegare uno sforzo acustico ben piú grande di quello strettamente sufficiente a creare la cavità. In determinate circostanze, un gas disciolto in un liquido può formare cavità sotto l'influenza di un intenso campo acustico. Le cavità crescono lentamente con il ripetersi dei cicli acustici man mano che il gas viene « pompato » dal liquido entro le bollicine; il gas intrappolato fa da cuscino alle bollicine, evitando il loro collasso.

Purtroppo le misurazioni della soglia di cavitazione acustica dei liquidi, eseguite da diversi sperimentatori, tendono a differire fra loro, probabilmente per le inevitabili differenze con cui ogni sperimentatore ha preparato il proprio campione di liquido. I risultati per l'acqua variano da –1 o –2 atmosfere fino a oltre –200 atmosfere. Come implicitamente suggerito da questi valori, il ruolo delle particelle microscopiche può essere determinante nello stabilire la soglia di cavitazione acustica. Martin Greenspan e Carl Tschiegg del National Bureau of Standards hanno misurato nell'acqua soglie di cavitazione acustica maggiori di –200 atmosfere, dopo una filtrazione di particelle eseguita con particolare cura; ciononono-

Una gocciolina di etere esplode trasformandosi in vapore dopo essere stata surriscaldata a una temperatura di 135 °C e contemporaneamente assoggettata a un notevole sforzo acustico. La gocciolina è sospesa nella glicerina dell'apparato illustrato nella pagina a fronte. La frequenza dell'eccitazione acustica è pari a 50 000 hertz, molto piú elevata della velocità della pellicola cinematografica (circa 3300 fotogrammi al secondo), per cui in questa sequenza si vede il movimento medio della cavità di vapore creata dall'esplosione. La successione dei fotogrammi qui riportati è ordinata dall'alto in basso, e da sinistra a destra.

In questo grafico sono riportate le condizioni per la vaporizzazione dell'etere (*in colore*) e dell'*n*-esano (*in nero*). In entrambi i casi la curva continua rappresenta le previsioni della teoria della nucleazione omogenea, la quale descrive le condizioni di formazione delle cavità di vapore in un liquido puro. Il punto di ebollizione normale dell'etere alla pressione atmosferica è a 35,6 °C. Le misurazioni della resistenza a trazione effettuate dall'autore per le pressioni negative (*punti in colore*) e da K. L. Wismer nel 1922 per le pressioni positive (*cerchietti in colore*) sono in ottimo accordo con la teoria. Il normale punto di ebollizione dell'*n*-esano alla pressione atmosferica è a 69 °C. Anche in questo caso, le misurazioni effettuate dall'autore per le pressioni negative (*punti in nero*) e quelle effettuate per le pressioni positive da V. P. Skripov e da G. V. Ermakov dell'Istituto Politecnico degli Urali (*cerchietti in nero*) sono in ottimo accordo con la teoria della nucleazione omogenea di Döring.

stante la cavitazione, con tutta probabilità, fu ancora iniziata da una particella rimasta ineliminata, o magari anche da un raggio cosmico di alta energia che ha attraversato il campione. La importanza del procedimento di filtrazione può essere compresa appieno quando si pensi che persino nell'acqua distillata possono riscontrarsi piú di 50 000 particelle per centimetro cubo. Gli esperimenti di Greenspan e Tschiegg, con i loro diligenti controlli, hanno comunque determinato un nuovo standard nel campo della cavitazione acustica.

Poiché il problema della cavitazione sulle superfici del contenitore e sulle particelle all'interno del liquido è cosí difficile da risolvere, decisi di sviluppare un differente metodo di indagine. Compresi, come già altri avevano fatto, che se il campione era ridotto a una gocciolina di diametro inferiore a 0,3 millimetri e sospesa in un liquido inerte (un liquido in cui il campione non si discioglie), avrei risolto due problemi. Primo, la gocciolina poteva essere cosí piccola da non contenere affatto particelle; secondo, il suo « contenitore » risultava costituito dalle superfici perfettamente lisce di un altro liquido.

La tecnica della gocciolina era stata usata nel 1958 da Hiromu Wakeshima e Kazuo Takata dell'Università di Kobe per misurare il limite di surriscaldamento di alcuni idrocarburi che salivano lentamente in un liquido ospite costituito da acido solforico concentrato e riscaldato. I limiti di surriscaldamento misurati erano facilmente riproducibili da campione a campione dello stesso liquido e corrispondevano bene alla teoria di Döring della nucleazione omogenea.

Con una tecnica simile anch'io ho trovato una buona corrispondenza con la teoria per liquidi come l'etere o l'*n*-esano. I risultati riguardanti l'acqua, questa sostanza dal comportamento cosí complicato, non sono tuttavia altrettanto ben riproducibili e risultano un poco discosti dalla teoria, la quale prevede un limite di surriscaldamento pari a circa 300 °C. Nel 1922 K.L. Wismer riferí di aver surriscaldato l'acqua fino a circa 270 °C alla pressione atmosferica. Milton Blander e Dennis Hengstenberg del North American Rockwell Science Center, in collaborazione con Joseph L. Katz del Clarkson College of Technology, riferirono il surriscaldamento di goccioline d'acqua in un fluido di siliconi fino a temperature superiori ai 265 °C e con buona probabilità vicine ai 280 °C. Alla Facoltà di ingegneria dell'Università di Yale io stesso ho misurato di recente un limite di surriscaldamento di 279,5 °C alla pressione atmosferica per goccioline d'acqua riscaldate nel benzilbenzoato liquido. Credo che questo risultato particolarmente elevato sia dovuto al fatto che mi preoccupai di pressurizzare l'acqua: tutte le particelle presenti risultavano pertanto bagnate piú a fondo.

Prima di questo recente lavoro con l'acqua, e mentre lavoravo alla Facoltà di ingegneria dell'Università di Harvard, avevo cominciato ad adattare la tecnica delle goccioline alla misura della resistenza a trazione di liquidi surriscaldati. Prima che questi esperimenti fossero compiuti non era stato dimostrato che un liquido surriscaldato è anche in grado di reggere sforzi di trazione. Per di piú, le misure sperimentali della resistenza a trazione dei liquidi non erano andate molto vicino alle previsioni basate sulla teoria della nucleazione omogenea.

È difficile produrre sforzi di trazione compresi fra le –200 e le –1000 atmosfere con mezzi acustici. (Le resistenze a trazione previste per molti liquidi comuni a temperatura ambiente ricadono in questo campo.) Perciò decisi di misurare la resistenza a trazione dei liquidi nello stato surriscaldato, dove le resistenze previste sono di molto inferiori a quelle misurate a temperatura ambiente. Per questo scelsi due liquidi, etere e *n*-esano, noti per avere una bassa resistenza a trazione.

Una gocciolina del liquido campione veniva iniettata in una colonna di vetro contenente glicerina filtrata, che faceva le funzioni del liquido ospite inerte. Il liquido ospite era piú denso del liquido della gocciolina per cui questa era costretta a salire lentamente nel tubo. Una bobina di riscaldamento avvolta intorno alla colonna instaurava un gradiente di temperatura fisso, in modo che la gocciolina salendo si riscaldava. Quando raggiungeva una certa altezza nella colonna, progettata come « regione di prova », essa era completamente nello stato surriscaldato. A questo punto penetrava in un campo di onde stazionarie generato da un suono ad alta frequenza immesso nella colonna: un trasduttore acustico piezoelettrico di forma cilindrica era incollato alla parete della colonna di vetro appena al di sopra della regione di prova. Quando si applica un campo elettrico a un materiale piezoelettrico, il campo produce una distorsione meccanica del materiale; una tensione alternata provocherà nel materiale vibrazioni con un certo periodo. In questo modo si genera un segnale acustico. Allo scopo di ricavare il massimo delle vibrazioni dal trasduttore, e per creare il campo di onde stazionarie nella glicerina, fissai la frequenza delle vibrazioni in modo che coincidesse con una frequenza di risonanza dell'intero sistema trasduttore-vetro-liquido. Il sistema entrava in risonanza a una frequenza di circa 50 000 hertz (cicli al secondo). Quando misurai il campo di pressione delle onde stazionarie con un sensore acustico miniaturizzato, riscontrai che, in queste condizioni di risonanza, la pressione acustica diminuiva allo spostarsi radialmente del sensore dal centro della colonna verso l'esterno. Inoltre, la pressione acustica variava ciclicamente lungo l'asse della colonna: presentava un valore di picco grosso modo ogni quattro centimetri e scendeva praticamente a zero nel punto intermedio fra due picchi successivi (*si veda la figura a pagina 22*).

Quando l'intensità della pressione acustica era incrementata fino a un determinato valore, la gocciolina in ascesa si fermava in un punto appena al di sopra di uno dei massimi della pressione acustica lungo l'asse della colonna. In altre parole, la gocciolina restava in levitazione. In questo punto della colonna la forza della pressione acustica bilanciava esattamente la naturale spinta di galleggiamento della gocciolina. La forza della pressione acustica rappresenta la forza totale che si esercita su di un oggetto come risultante di un'onda sonora che lo colpisce; normalmente è un effetto di scarsa entità, ma quando si producono in un liquido elevate pressioni acustiche e forti gradienti di pressione, esso può diventare notevole.

Quando la pressione acustica veniva ulteriormente aumentata, la gocciolina si muoveva un poco verso una nuova posizione di equilibrio piú vicina al massimo di pressione; in certi casi, e per una pressione acustica sufficientemente elevata, la levitazione veniva interrotta dall'esplosione della gocciolina in vapore. In corrispondenza di alcune adeguate combinazioni di surriscaldamento e di sforzo acustico, la gocciolina di liquido raggiungeva la sua massima resistenza a trazione e vaporizzava. L'esperimento può essere ripetuto per differenti temperature della regione di prova, permettendo in tal modo la misura del legame tra l'ammontare dello sforzo acustico e la temperatura di surriscaldamento quali cause della vaporizzazione della gocciolina. I risultati di queste misure effettuate con l'etere e l'*n*-esano ci hanno fornito la resistenza a trazione di questi liquidi in funzione della temperatura. Ho riscontrato che nell'ambito delle temperature utilizzate per gli esperimenti la massima resistenza a trazione del liquido (la massima pressione acustica meno la pressione idrostatica) aumenta in modo approssimativamente lineare con la diminuzione della temperatura. Credo che i risultati sarebbero gli stessi per uno sforzo statico di trazione della stessa intensità dello sforzo massimo riscontrato nelle misure acustiche. La ragione è che la durata dello sforzo massimo (circa un milionesimo di secondo) è lunga se paragonata al tempo necessario perché una fluttuazione di densità produca una cavità di dimensioni critiche nel liquido surriscaldato sotto sforzo.

È interessante confrontare questi risultati relativi alle pressioni negative con i risultati ottenuti da altri ricercatori che hanno misurato il limite di surriscaldamento degli stessi liquidi in funzione delle pressioni positive. Per esempio, nel 1922 Wismer ha misurato il limite di surriscaldamento di campioni di etere contenuti in tubi capillari e soggetti a diverse pressioni positive. I suoi risultati per le pressioni positive giacciono sulla stessa curva di interpolazione dei miei risultati per le pressioni negative, ed entrambi i risultati sono in ottimo accordo con le previsioni della teoria di Döring della nucleazione omogenea. Nel 1964 V. P. Skripov e G. V. Ermakov dell'Istituto Politecnico degli Urali in URSS, hanno misurato il limite di surriscaldamento di goccioline di *n*-esano che risalivano in un liquido ospite riscaldato costituito da acido solforico concentrato, sottoposto a diverse pressioni positive ottenute per mezzo di un gas inerte al di sopra di esso. Anche in questo caso i risultati per le pressioni positive sono del tutto congruenti con quelli per le pressioni negative, e sono in buon accordo con la teoria. Questa congruenza è stata ottenuta a dispetto dei diversi « contenitori » dei campioni (glicerina, tubi capillari, acido solforico concentrato).

Queste osservazioni suggeriscono evidentemente che per i liquidi provati le cavità di vapore si erano formate all'interno del campione stesso e non sull'interfaccia liquido-liquido o liquido-solido. Inoltre i risultati avvalorano la teoria, talvolta controversa, della nucleazione omogenea. Ulteriori esperimenti con altri liquidi risultano però necessari per una prova piú completa della teoria.

La tecnica della levitazione della gocciolina ha spalancato nuove possibilità per lo studio dello stato liquido, possibilità che stiamo attualmente indagando a Yale. Questa tecnica potrebbe metterci nelle condizioni di imparare di piú sulle proprietà dei liquidi negli stati surriscaldato, sovraespanso e sottoraffreddato. Se l'apparato venisse modificato, si potrebbe osservare la solidificazione di goccioline sottoraffreddate. È noto che l'acqua può essere sottoraffreddata fino a – 40 °C, o anche al di sotto di questa temperatura, prima di solidificare. Le goccioline d'acqua nelle nuvole sono talora sottoraffreddate fino a questo punto. Noi abbiamo surriscaldato l'acqua fino a quasi 280 °C alla pressione atmosferica; quindi, in aggiunta a quello che già si conosce dell'acqua fra 0 °C e 100 °C, potremmo imparare molto riguardo alle proprietà dell'acqua a pressione atmosferica fra – 40 °C e 280 °C. Esperimenti di questo tipo potrebbero allargare in modo considerevole la nostra conoscenza dello stato liquido della materia, spesso cosí misterioso.

I mesozoi

Sono animali formati da solo venti cellule che vivono in un ambiente particolarmente ristretto: l'urina di alcuni cefalopodi. Essi possono fornire importanti informazioni sullo sviluppo degli organismi pluricellulari

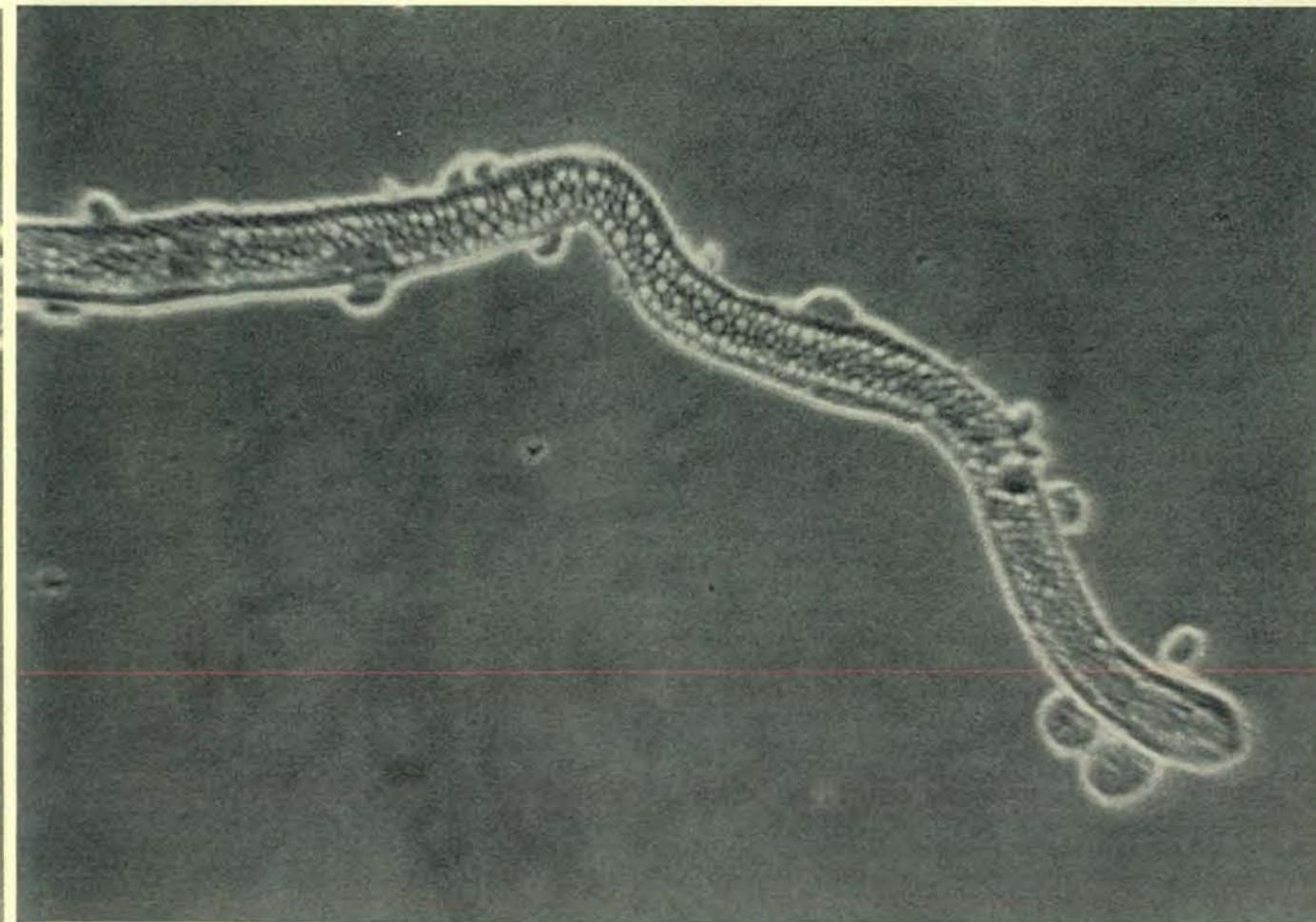
di Elliot A. Lapan e Harold Morowitz

In varie nicchie della biosfera vi sono organismi che sono completamente differenti dalle specie con le quali i biologi sono abituati a lavorare in laboratorio. Le caratteristiche di questi organismi forniscono alcune volte la traccia per la risoluzione di alcuni problemi fondamentali per la biologia. Nel regno animale, la maggior parte degli organismi o sono fortemente pluricellulari, essendo costituiti da un numero di cellule che varia da un migliaio ad alcuni trilioni, oppure unicellulari cioè con una sola cellula. Solamente un gruppo minore, che può rappresentare attualmente un sottoregno del regno animale, ha organismi con un numero intermedio di cellule. I piccoli individui marini di questo gruppo, chiamati mesozoi, sono per la maggior parte composti da un numero di cellule che varia tra 20 e 30.

I mesozoi per molto tempo sono stati praticamente sconosciuti ai biologi sperimentali a causa del loro particolare ambiente di vita: il rene dei cefalopodi bentonici (polpi di profondità, seppie e loro simili). L'incentivo che ci ha spinti alla ricerca di questi strani organismi è la possibilità di studiare la differenziazione cellulare e lo sviluppo embrionale utilizzando un organismo che rappresenta il piú basso stadio di organizzazione multicellulare finora conosciuto.

Verso la fine del XVIII secolo, l'italiano Filippo Cavolini rinvení nei polpi alcuni piccoli organismi vermiformi. Nel 1839 essi furono descritti dal tedesco A. Krohn che li chiamò diciemidi, ma solo nel 1876 il biologo belga Eduard van Beneden li sottopose a un attento studio. Egli concluse i suoi studi ponendo questi organismi a metà strada, nella scala evolutiva, tra i protozoi unicellulari e i metazoi multicellulari e usò per essi il termine di mesozoi. Questo termine fu ben presto usato per descrivere una varietà di animali di dubbia derivazione. Il gruppo dei mesozoi fu ulteriormente diviso in diciemidi e ortonettidi. Un recente lavoro di Eugene N. Kozloff dell'Università di Washington ha tuttavia dimostrato che gli ortonettidi sono strutturalmente piú complicati di quanto originariamente si credesse. Per questo motivo, dopo circa 100 anni dalla loro scoperta, al gruppo dei mesozoi si attribuiscono tuttora solamente i diciemidi.

Solo alcuni dei pochi biologi che hanno studiato i mesozoi, da quando van Beneden fece le sue dettagliate osservazioni, sostenne l'ipotesi che questi organismi rappresentassero uno stadio intermedio nel cammino evolutivo verso gli animali pluricellulari. La opinione prevalente era che i mesozoi avessero subito, in un secondo tempo, una semplificazione o per cosí dire fossero « degenerati » da vermi piatti loro antenati. Questa seconda ipotesi era basata sul fatto che si riteneva che i mesozoi avessero un ciclo vitale piú complesso di quanto sia realmente e su una vaga rassomiglianza tra le larve dei mesozoi e quelle dei vermi piatti. Recenti studi nei nostri laboratori, presso la Yale University, alcuni dei quali anche a livello molecolare, hanno indicato che gli organismi di van Beneden possono offrire interessante materia di studio. Essi infatti sono particolarmente adatti per lo studio sull'evoluzione degli animali multicellulari e per la conoscenza dei meccanismi di differenziazione cellulare e sviluppo.

I mesozoi adulti, il cui habitat naturale è l'urina dei cefalopodi, sono degli organismi filiformi di lunghezza variabile tra i 5 millimetri per i piú piccoli e i 7 millimetri per i piú grossi a seconda delle specie. Essi sono formati essenzialmente da una lunga cellula cilindrica (cellula assiale) circondata da una specie di manicotto formato da 20-30 cellule. Il numero esatto delle cellule di rivestimento varia a seconda delle specie, ma è costante per ognuna di esse. Nell'interno della cellula assiale c'è un piccolo numero di cellule la cui funzione è essenzialmente riproduttiva. Queste, chiamate assoblasti e presenti in numero variabile tra 1 e 100, possono dare origine, direttamente, a una forma adulta o, indirettamente, a una forma larvale. Solo 2 divisioni di un assoblasto sono sufficienti per stabilire le differenti linee di sviluppo cellulare in un individuo adulto vermiforme. La prima divisione evidenzia la prima cellula di rivestimento che darà poi origine alle rimanenti cellule di rivestimento; la seconda divisione separa le cellule progenitrici della futura generazione di assoblasti dalla cellula assiale. Superato questo punto, lo sviluppo si svolge interamente entro i confini della cellula assiale dell'individuo progenitore. Dopo un certo allungamento dell'embrione e una modificazione delle prime cellule di rivestimento, l'organismo immaturo viene liberato dalla cellula assiale progenitrice nell'urina dell'ospite. Lo sviluppo procede con un incremento delle dimensioni della cellula e l'organismo che si sta sviluppando può attaccarsi al tessuto spugnoso del rene del cefalopodo insieme alla popolazione di individui vermiformi che parassitizza l'organo. Si ha un'altra forma di sviluppo quando la popolazione vermiforme che parassitizza il rene dell'ospite diventa troppo numerosa. Alcuni assoblasti, invece di svilupparsi in embrioni dell'individuo vermiforme, si trasformano in una struttura che può essere considerata una cellula assiale di un adulto vermiforme e funge da gonade ermafrodita. Questa struttura,

Mesozoo visto al microscopio a 160 ingrandimenti. Si tratta di un diciemide adulto parassita del rene di polpi, seppie e altri cefalopodi. Questo organismo esternamente è simile ai vermi piatti. I diciemidi adulti possono raggiungere la lunghezza di oltre 7 millimetri. Nell'interno della lunga cellula assiale si intravedono altre cellule che sono degli « assoblasti » che daranno origine a due tipi di giovani individui.

che può essere chiamata infusorigena, è in un certo senso l'unico organo in possesso dei mesozoi. Le uova prodotte vengono fecondate dallo sperma proveniente dallo stesso organo e si sviluppano in un individuo noto come larva infusoriforme. Questa larva supera raramente il diametro di 0,04 millimetri; la sua forma può essere sferica od ovale a seconda della specie e possiede due caratteristiche cellule a una estremità. Queste cellule, dette apicali, sono quasi interamente riempite da una sostanza ad altissima densità. Quattro cellule incapsulate al centro della faccia inferiore di ogni infusiforme contengono a loro volta un'altra cellula. Si ritiene che queste cellule fungano da cellule germinali nella trasmissione dell'infezione mesozoica ad altri cefalopodi. Quando lo sviluppo della larva infusoriforme è completo, l'organismo, composto da 28 cellule, esce dalla cellula assiale vermiforme progenitrice riversandosi nell'urina del cefalopodo e da qui nel mare. Per un po' di tempo si era ritenuto che le larve entrassero in un ospite intermedio, ma dati recentemente acquisiti hanno sottolineato la inutilità di un ospite intermedio per la trasmissione dell'infezione.

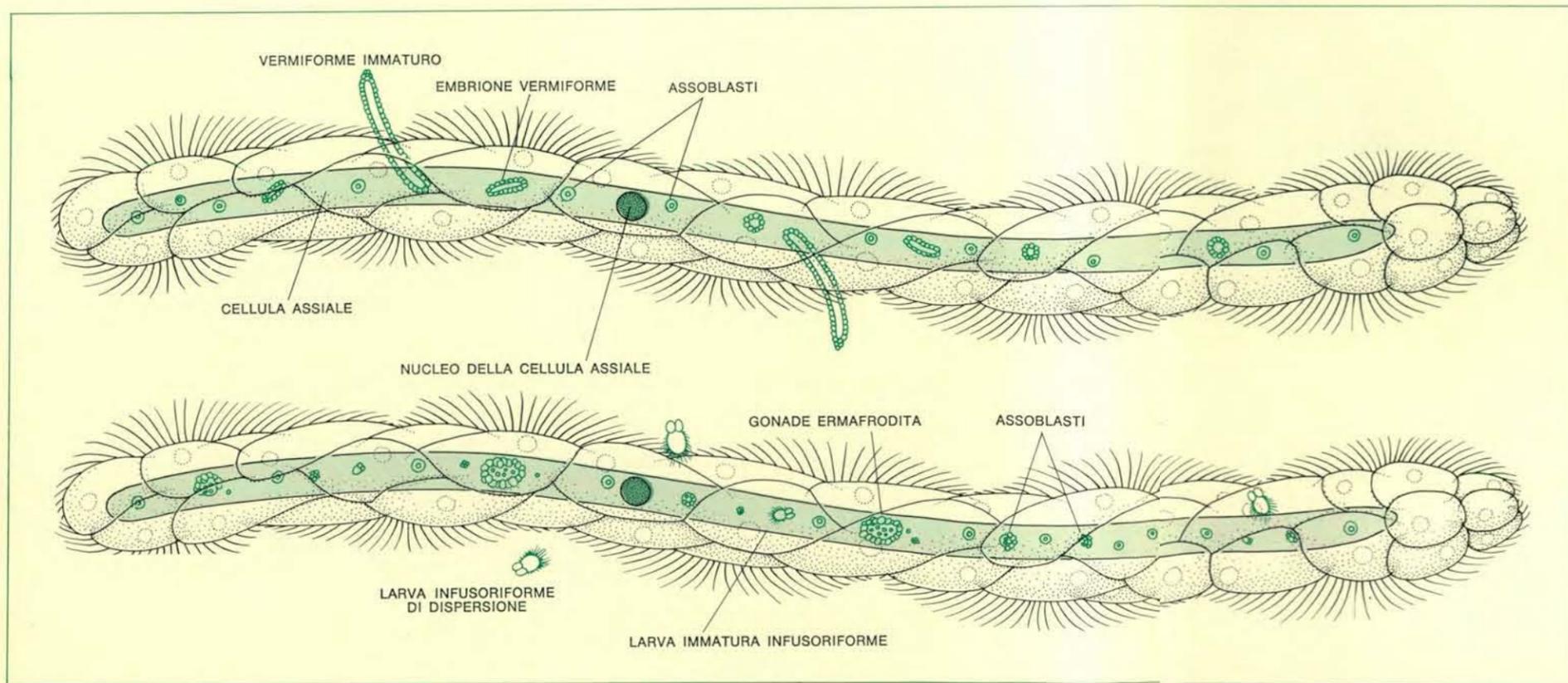
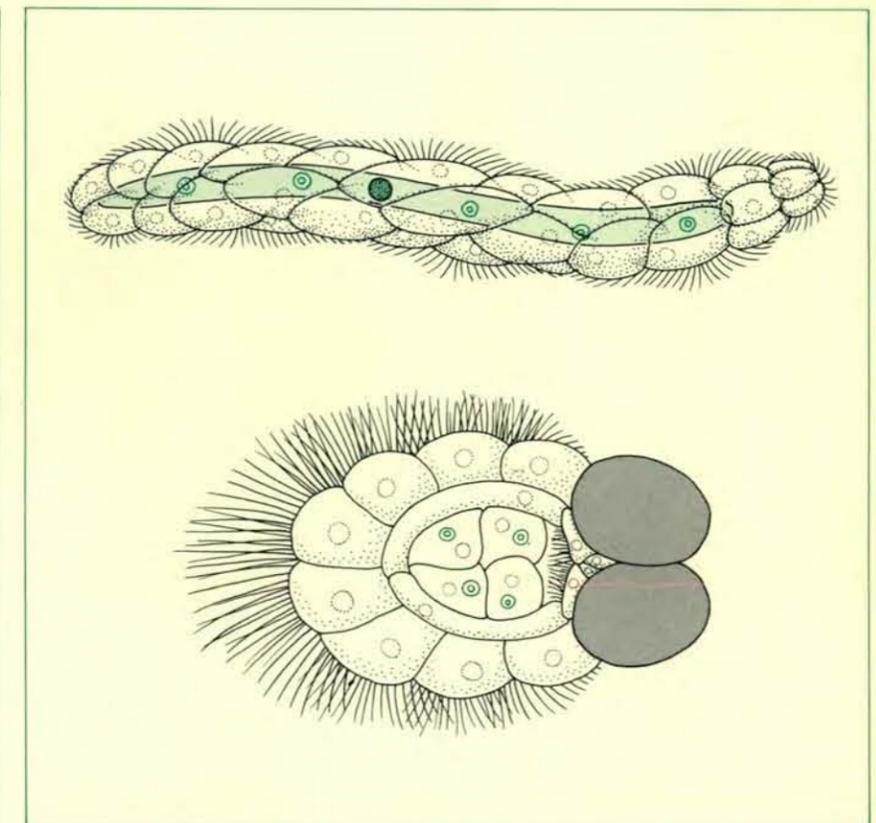
Una forma simile a un mesozoo adulto compare nei primi stadi dell'infezione dei cefalopodi. Questa però differisce dall'adulto in quanto possiede tre cellule assiali organizzate in sequenza lineare, è piú corta e piú larga e darà origine esclusivamente a individui vermiformi. Questi ultimi possono derivare direttamente o indirettamente da alcune cellule degli infusoriformi.

Il ciclo vitale dei mesozoi diciemidi può essere cosí brevemente riassunto. L'infusoriforme (o alcune parti di esso), che si deposita sul fondo del mare a causa delle due cellule apicali riempite di sostanza densa, è raccolto dai cefalopodi che nuotano in profondità. Dopo un certo percorso nel corpo del cefalopodo (recenti dati ottenuti nel nostro laboratorio indicano che il cammino può essere quello dell'apparato circolatorio) le cellule provenienti dall'infusoriforme entrano nel rene e si sviluppano nelle strutture che daranno origine agli individui vermiformi nello stesso modo in cui questi ultimi si moltiplicano. Questi ultimi si riproducono fino a dar origine a una densa popolazione nel rene dell'ospite. Al microscopio sono stati visti preparati di rene con centinaia di migliaia di individui attaccati. A questo punto vengono prodotte le larve infusoriformi che lasciano il cefalopodo con l'urina completando cosí il ciclo.

L'incerta posizione evolutiva dei mesozoi non può essere risolta solamente in base alle apparenze. L'originale organizzazione multicellulare, lo strano sviluppo endocellulare dell'embrione, l'abbondanza di ciglia in ogni forma, lo sviluppo nelle cellule assiali degli adulti di un macronucleo simile a quello dei protozoi e un ciclo vitale relativamente semplice sono tutti dati contrari all'ipotesi che i mesozoi siano derivati da una secondaria semplificazione di vermi piatti parassiti. L'importanza di queste caratteristiche del resto non può essere quantitativamente stimata. Solamente la biochimica può portarci un valido aiuto per la determinazione della posizione evolutiva di questi particolari organismi.

La tassonomia biochimica è stata considerata per molto tempo un valido sistema per valutare le relazioni esistenti tra vari organismi. Le variazioni dei gruppi specifici nella composizione di certe comuni proteine e la sequenza degli amminoacidi costituenti sono indici delle affinità tra determinati gruppi. Anche gli acidi nucleici, che codificano le informazioni determinanti la sequenza degli amminoacidi e la composizione delle proteine, possono essere usati per spiegare le affinità tra gruppi. Nel DNA il relativo ammontare delle quattro basi comuni (adenina, timina, guanina e citosina) è costante, per un dato organismo, e può essere espresso mediante la percentuale di guanina piú citosina (G + C). La quantità di G + C nel DNA contenuto in gruppi strettamente affini tra loro (specie e generi) varia impercettibilmente. Le principali eccezioni si trovano tra gli organismi primitivi che si riproducono rapidamente; questi infatti hanno avuto molto piú tempo per differenziarsi l'uno dall'altro di quanto ne abbiano avuto i gruppi di piú recente evoluzione. Le differenze o le similitudini nel contenuto di G + C possono perciò fornire informazioni sull'affinità tra i maggiori gruppi.

Abbiamo trovato che il DNA estratto da *Dicyemennea*, un genere piuttosto comune di mesozoi diciemidi, ha un contenuto di G + C veramente basso calcolabile intorno al 23 per cento. Valori cosí bassi sono stati rinvenuti solamente in pochi altri organismi, tutti unicellulari. Varie specie e ceppi di *Tetrahymena*, un protozoo ciliato molto usato in biologia, hanno valori di G + C compresi tra il 23-30 per cento. Anche varie specie di *Paramecium*, un altro protozoo ciliato, hanno un basso contenuto di G + C: solo il 23 per cento. Un organismo simile all'ameba, il *Dictyostelium discoideum*, utilizzato per lo studio dei meccanismi di controllo delle organizzazioni pluricellulari, ha il 22 per cento di G + C. Molto importante è il fatto che siano stati trovati valori di G + C compresi dal 22 al 35 per cento nei protozoi ciliati, mentre nei protozoi flagellati questo contenuto raggiunge il 45-60 per cento. Sfortunatamente, pochi dati sono disponibili sui platelminti, gruppo dal quale si pensa siano originati i mesozoi. I pochi valori riguardanti il contenuto di G + C nei vermi piatti, da noi misurati o sui quali ci siamo documentati, sono tutti compresi tra il 35 e il 50 per cento.

L'indice piú rigoroso di un rapporto tra due gruppi lontanamente correlati, può essere ottenuto comparando le quantità di G + C contenute nell'RNA ribosomale dei differenti organismi. L'RNA ribosomale è un particolare tipo di RNA che è contenuto nei ribosomi. Queste strutture sono intimamente coinvolte nei processi di sintesi proteica. La sequenza, come pure le relative percentuali delle basi che costituiscono la catena dell'RNA ribosomale, varia leggermente in individui lontanamente correlati. Queste ricerche ci danno però informazioni meno dettagliate di quelle forniteci dai lavori sui contenuti di G + C nel DNA. Nei nostri laboratori sono stati condotti esperimenti preliminari i quali ci hanno indicato che il contenuto di G + C nell'RNA ribosomale è circa il 40 per cento. Questo valore è insolitamente basso per l'RNA cosí come lo era il 23 per cento per il DNA. È stato trovato che in *Tetrahymena* e *Dictyostelium* c'è una uguale quantità di G + C nell'RNA ribosomale. Lo sviluppo di nuove tecniche, che permettono di comparare le sequenze dell'RNA ribosomale in vari organismi, ci permettono di ottenere nuovi dati chiarificatori su alcuni rapporti evolutivi ancora discussi. L'applicazione di queste tecniche a invertebrati, posti in basso nella scala zoologica, può eventualmente rivelare il significato evolutivo non solo dei mesozoi, ma anche dei protozoi ciliati e

Sono qui illustrati i due sistemi di riproduzione dei diciemidi. In alto: l'organismo produce una progenie simile a se stesso; in basso: la progenie è completamente differente dal genitore. Nel primo caso gli assoblasti che si trovano nella lunga cellula assiale producono individui vermiformi. Nel secondo caso essi danno luogo a gonadi che contengono sia uova, sia spermatozoi. Quando le uova vengono fecondate, gli embrioni che si sviluppano saranno di « infusoriformi ».

Due tipi di progenie, vermiforme (*in alto*) e infusoriforme (*in basso*). Quando escono dal corpo del genitore i giovani individui vermiformi rimangono attaccati al rene dell'ospite mentre gli infusoriformi vengono eliminati insieme all'urina dell'ospite.

flagellati e di altri primitivi gruppi di animali.

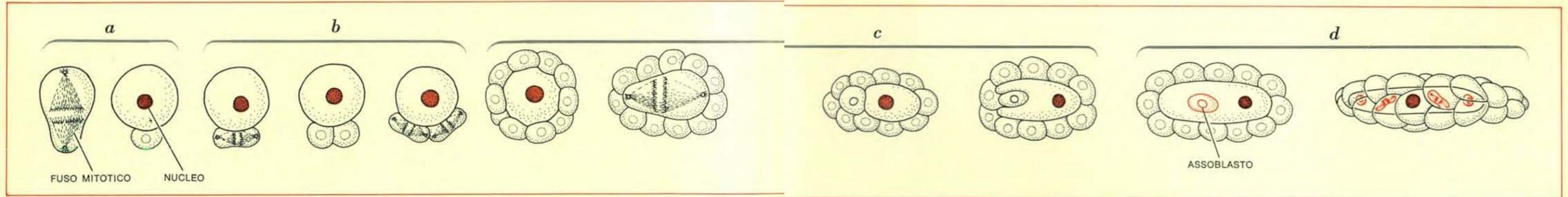
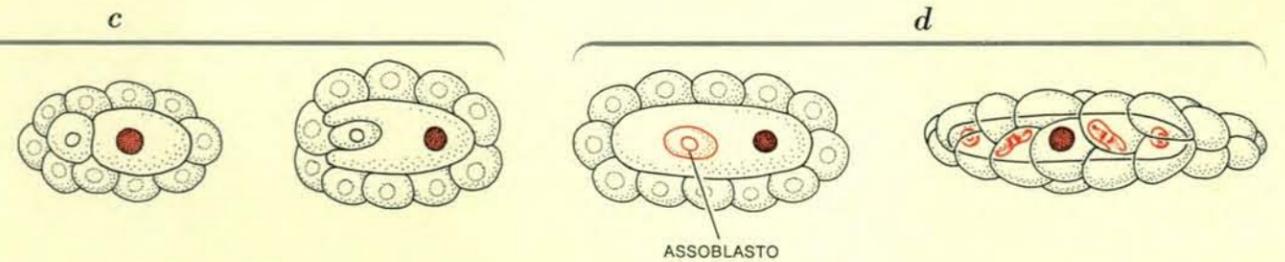
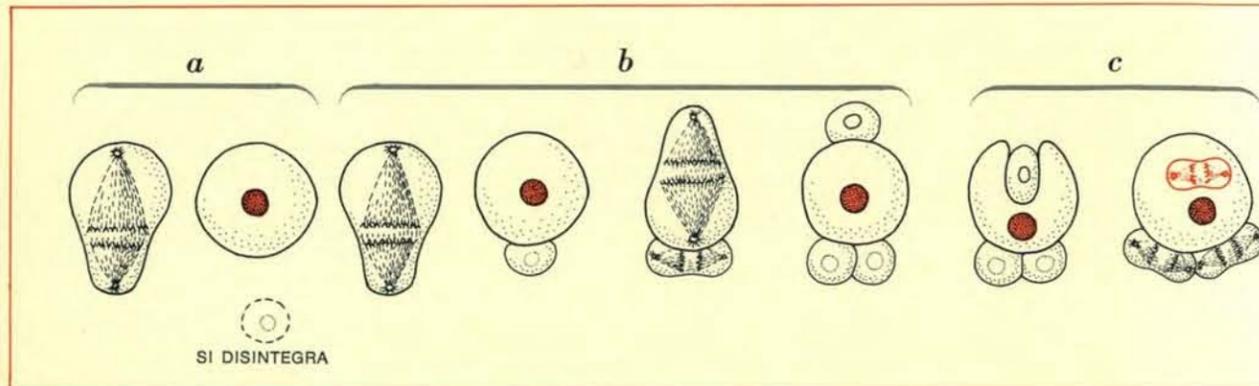
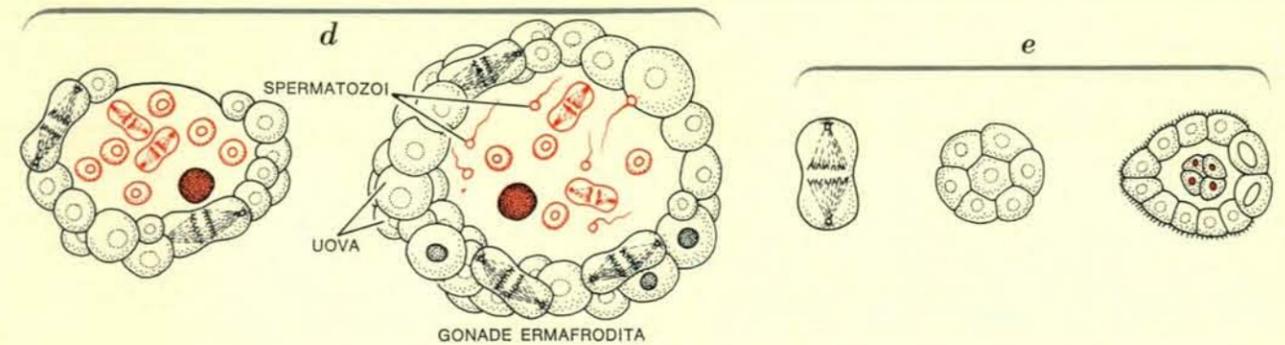
I maggiori ostacoli, per la comprensione della storia evolutiva e della vita dei mesozoi diciemidi, sono rappresentati sia dall'ambiente molto ristretto in cui vivono, sia dalle condizioni nutritive di questi organismi. Inoltre si ritiene che ci sia ancora da scoprire uno sconosciuto ospite intermedio e perciò un ulteriore stadio del ciclo vitale. Lo studio sia biochimico, sia dello sviluppo, di un organismo che non può essere convenientemente coltivato in laboratorio è sempre carico di difficoltà. Solo recentemente infatti è stato possibile tenere dei cefalopodi in cattività. Molti dei nostri sforzi sono perciò stati diretti verso la risoluzione dei problemi di mantenimento e coltura dei mesozoi.

Le nostre ricerche furono indirizzate inizialmente nel produrre in laboratorio l'urina dei cefalopodi in cui i mesozoi trovano il loro nutrimento. Esso fallí probabilmente perché, inavvertitamente, omettemmo fattori nutritivi ed elementi che non avevamo trovato analizzando l'urina. Risolvemmo il problema mantenendo in coltura una porzione di rene di polpo ottenendo cosí un ambiente approssimativamente uguale a quello in cui vivono i mesozoi. Questi piccoli organismi potevano anche essere tenuti fuori dal tessuto renale in un contenitore di vetro per poterli meglio osservare. Alla fine si scoprí che i mesozoi non hanno bisogno del contatto fisico con il rene per riprodursi. Fu studiato un sistema per tenere separati i mesozoi dal rene: una membrana dializzatrice che permetteva la diffusione delle molecole e degli elementi essenziali dal rene agli organismi.

Benché originariamente avessimo considerato i mesozoi dal punto di vista di animali da laboratorio relativamente semplici e quindi addetti allo studio di alcuni problemi dello sviluppo degli organismi pluricellulari, abbiamo in seguito ottenuto importanti informazioni sul loro ciclo vitale. Sono stati descritti due differenti stadi vermiformi dei mesozoi: « nematogeni » e « rombogeni ». Si suppone che i rombogeni producano larve infusoriformi di dispersione e occasionalmente possano ritornare allo stadio nematogeno. Osservazioni su popolazioni di mesozoi in laboratorio fanno ritenere ingiustificate queste distinzioni. In condizioni di bassa densità di popolazione gli individui vermiformi producono in maggior parte vermiformi, invece quando la popolazione raggiunge un'alta densità quasi tutti gli organismi producono infusoriformi. Un semplice esperimento ha dimostrato che lo stimolo responsabile del cambiamento di attività riproduttiva di questi organismi sia da ricercare nell'accumulo di un fattore chimico nell'ambiente in cui i mesozoi vivono. Quando il liquido in cui vive una popolazione di mesozoi molto densa viene aggiunto a quello in cui vive una popolazione scarsa, la maggior parte dei vermiformi viventi nella popolazione a bassa densità produrrà larve infusoriformi di dispersione nel giro di 24 ore.

Piccole cellule somiglianti ad assoblasti sono state rinvenute in certe regioni del sistema circolatorio dei polpi, fuori cioè dalla loro usuale sede che è il rene. Il DNA estratto da colture di queste cellule presenta lo stesso contenuto di G + C che si trova nei mesozoi e anche la stessa configurazione nucleare. Sarà interessante vedere se queste cellule potranno dare origine a una forma simile a un mesozoo. In alcune colture di tessuto renale, nelle quali erano presenti le cellule simili agli assoblasti e gli stadi vermiformi e infusoriformi dei mesozoi, sono state trovate strutture nematogene. Siccome le strutture nematogene, varianti degli individui vermiformi, sono viste solo nei primi stadi dell'infezione dei cefalopodi, ed erano invece presenti in coltura solo le cellule simili agli assoblasti e le forme infusoriformi e vermiformi, è probabile che l'ipotetico stadio che si supponeva desse origine ai nematogeni sia inesistente.

Osservazioni su cefalopodi tenuti in cattività ci hanno portato a escludere la necessità di un ospite intermedio nel ciclo vitale dei mesozoi. Due estati orsono, lavorando alla Scripps Istitution of Oceanography in collaborazione con Erich Hochberg e Dennis Todd, trovammo che l'infezione dovuta ai mesozoi avveniva benissimo anche in acquario. Dopo un accurato esame dell'acquario in cui i polpi vivevano non è stato trovato nessun candidato al posto di ospite intermedio. Rimangono però delle incertezze: o gli ospiti intermedi erano stati mangiati dai giovani cefalopodi o erano scomparsi in altro modo oppure l'infezione poteva essere trasmessa in una qualsiasi maniera alle uova dei cefalopodi. Questa ultima ipotesi è molto improbabile perché Bayard H. McConnaughey dell'Università dell'Oregon ha sezionato le uova di cefalopodi infetti e non ha trovato traccia di mesozoi. Entrambe le possibilità furono scartate dopo le osservazioni di Alain Richard dell'Institute of Maritime Biology a Wimereux in Francia che tenne in acquari isolati delle seppie. Richard ha trovato che questi animali, allevati fino alla maturità isolati da altri, derivati dallo stesso gruppo di uova, non presentavano mai un'infezione dovuta a mesozoi fino a quando non venivano posti in acquari con animali infetti.

Questa semplificazione del ciclo vitale dei mesozoi ha indebolito uno degli argomenti principali usati per associare i mesozoi ai vermi piatti parassiti. Questi ultimi presentano infatti un complicato ciclo vitale e uno o più ospiti intermedi. La possibilità di tutti e due i modi di riproduzione, sessuale o asessuale non è peculiare dei soli vermi piatti parassiti, come avevano invece affermato certi biologi cercando l'origine dei mesozoi. Molti protozoi e batteri possono riprodurre se stessi, sia per semplice divisione cellulare, che per ricombinazione del loro materiale genetico. In nessun modo si può dire che il ciclo vitale dei mesozoi diciemidi presenti alternanza di generazioni: gli individui vermiformi non hanno bisogno infatti di dare infusoriformi per riprodursi. Nei veri casi di alternanza ogni forma deriva esclusivamente dalla forma alternante. È possibile che i mesozoi una volta fossero organismi a vita libera probabilmente esistenti solo come individui vermiformi nei primitivi oceani. Col variare delle condizioni ambientali di questi oceani, i mesozoi hanno cercato il loro habitat nelle urine dei cefalopodi, dove prosperano senza un apparente dan-

Lo sviluppo degli individui vermiformi passa attraverso gli stadi qui illustrati cominciando da una ineguale divisione dell'assoblasto (*a*) in due cellule. La cellula piú piccola continua a dividersi (*b*) mentre quella piú grande verrà presto rivestita da uno strato di piccole cellule. Quando questo stadio è raggiunto, la cellula piú grande subisce una ineguale divisione (*c*) in seguito alla quale la cellula maggiore ingloba quella piú piccola, che diventa il primo assoblasto nella cellula assiale.

Lo sviluppo degli infusoriformi passa attraverso una differente serie di stadi, che portano a una riproduzione sessuale. Solamente la cellula piú grande prodotta dalla prima ineguale divisione dell'assoblasto (*a*) va avanti a svilupparsi. Essa si divide in maniera disuguale (*b*) e ambedue le cellule prodotte dalla divisione continuano a dividersi; quella di maggiori dimensioni si dividerà ancora in maniera disuguale mentre la piú piccola darà origine a due cellule della stessa grandezza che continuando a dividersi rivestiranno le altre due. Contemporaneamente la cellula piú grande ingloba quella piú piccola (*c*), che a sua volta incomincia a dividersi. Gli assoblasti divengono quindi delle gonadi ermafrodite (*d*). Le cellule di rivestimento continuano a dividersi e producono uova e quelle inglobate spermatozoi. Quando le uova vengono fecondate dagli spermatozoi maturati nella stessa gonade, o in una vicina, si sviluppano degli embrioni che daranno origine a larve infusoriformi (*e*).

no per i loro ospiti. L'urina dei cefalopodi differisce dalle odierne acque marine per il contenuto molto piú alto di composti azotati e fosfati. La evoluzione della forma larvale, prodotta in abbondanza e adattatasi per la sopravvivenza negli oceani in continuo cambiamento, ha permesso l'insediamento delle varie specie di mesozoi nelle nicchie che ora occupano. Abbiamo visto che gli individui vermiformi si riproducono direttamente fino a quando l'ambiente in cui vivono si fa troppo affollato cosí che la produzione di larve che si disperdono ha il significato di una difesa contro l'esplosione demografica ed è allo stesso tempo un'assicurazione contro l'eventuale scomparsa del loro habitat e cioè la morte del cefalopodo ospite.

È possibile sperare d'imparare alcune cose dallo studio dei mesozoi diciemidi? Tutti gli organismi pluricellulari, siano questi i mesozoi o l'uomo, si sviluppano da una singola cellula che possiede una sola serie di cromosomi (il genoma). I cromosomi contengono DNA nelle cui eliche sono codificate tutte le informazioni necessarie per la sintesi del materiale cellulare e il controllo delle funzioni cellulari di tutti i tipi di cellule costituenti un organismo. Durante lo sviluppo embriologico questo insieme di informazioni sembra sia trasmesso, se non a tutte, almeno alla maggior parte delle cellule dell'organismo. È interessante occuparsi del problema di come, quando e perché due linee cellulari, con il medesimo patrimonio genetico, differiscano a un certo punto sia fisiologicamente, sia morfologicamente, dando cellule del fegato, fibre muscolari, cellule che si dividono rapidamente come quelle tumorali o che non si dividono mai come le fibre nervose.

I mesozoi forniscono un sistema relativamente facile per potere indirizzare le ricerche in questo senso. In determinate condizioni, gli assoblasti degli individui vermiformi danno origine direttamente a embrioni di vermiformi, mentre, in altre condizioni (come una alta densità di popolazione), essi si sviluppano in strutture infusoriformi che producono spermatozoi e uova. Una simile specializzazione o differenziazione avviene spontaneamente in tutti gli organismi pluricellulari. La semplicità dei mesozoi fa di essi un eccellente soggetto per studiare le condizioni che guidano questa differenziazione.

Un'altra opportunità sperimentale è data dalla risposta dei mesozoi all'alta densità di popolazione. Abbiamo visto che un elevato numero di individui e l'accumulo di un fattore chimico solubile nel mezzo in cui i mesozoi vivono, fa sí che gli assoblasti si differenzino in strutture infusorigene. L'innesco di una sequenza di eventi, che inizia con la prima divisione dell'assoblasto per poi continuare con la produzione di larve infusoriformi di dispersione, è data appunto dal fattore densità di popolazione. Siccome noi possiamo facilmente creare le condizioni che portano all'accumulo del fattore chimico, e condurre i nostri esperimenti in condizioni tali da analizzare con un'alta precisione ogni componente chimico, siamo ottimisti sulla possibilità di isolare e identificare questo fattore.

La fine della sequenza delle tappe dello sviluppo è indotta da un'altra sostanza: il denso materiale che incomincia ad accumularsi nelle cellule apicali degli infusoriformi, nelle ventiquattro ore successive all'inizio dello sviluppo, e che del resto costituirà un terzo del peso di ogni larva. Noi abbiamo isolato questa sostanza e stiamo per identificarla.

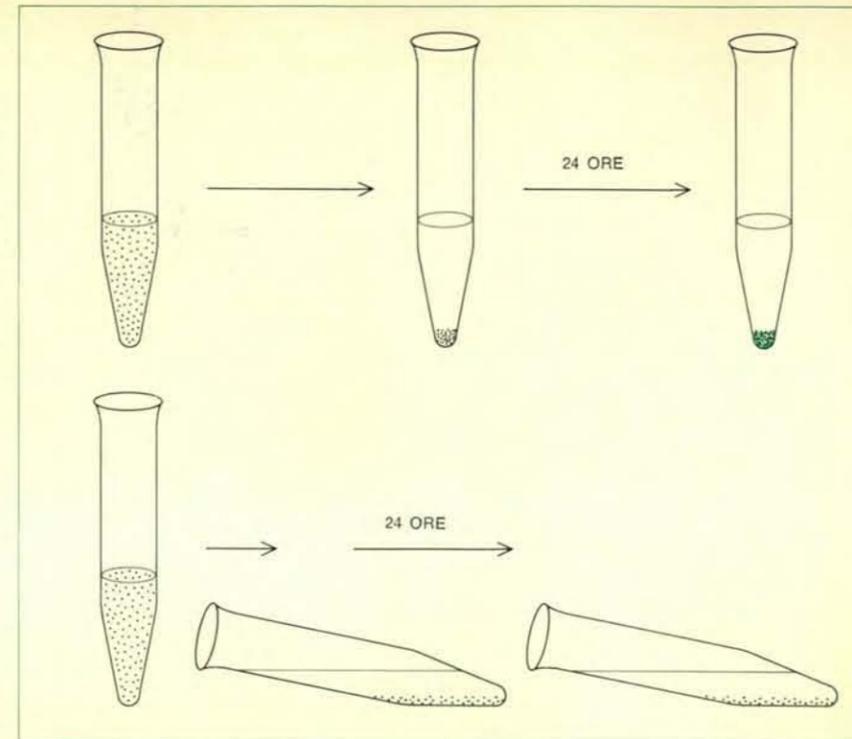
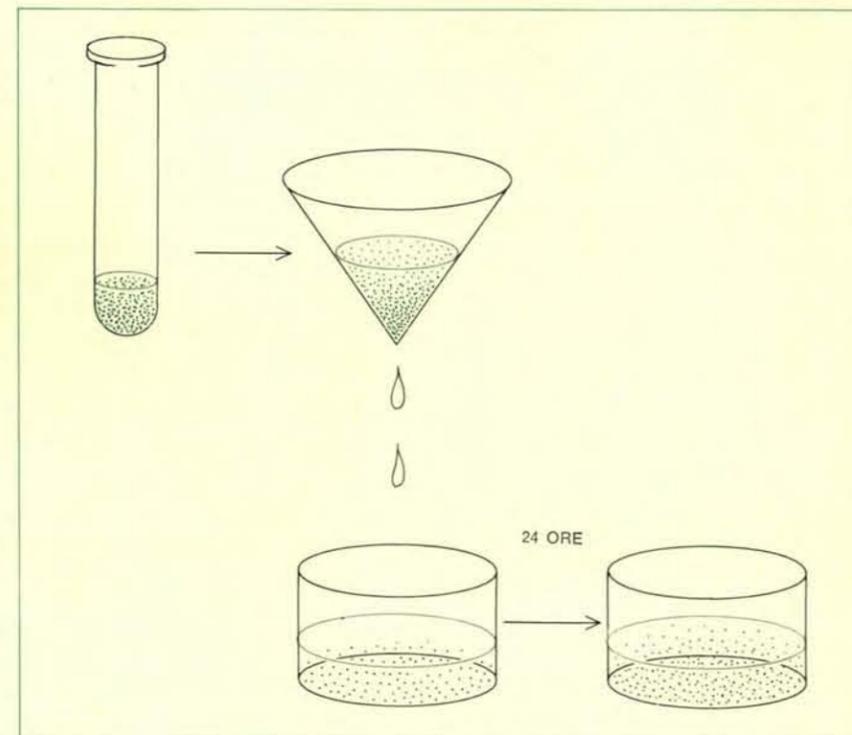
Altre opportunità ci sono state offerte dalla rapidità dello sviluppo e dalla quantità con cui la suddetta sostanza veniva prodotta in ogni cellula apicale. La sintesi e l'accumulo di una sostanza, che costituisce piú di un terzo del peso di un organismo, deve essere accompagnata da una buona quantità di acido nucleico messaggero specifico per quella sostanza, e da enzimi e fattori di controllo per questo processo. I mesozoi si presentano in questo modo come un substrato sperimentale in cui la molla iniziale e il prodotto finale dello sviluppo sono a portata di mano, oltre a essere considerevoli le possibilità di studio degli stadi intermedi e i meccanismi di controllo. L'introduzione di metaboliti intermedi isolati e di fattori di controllo in un organismo che si sta sviluppando può essere utile per la comprensione della dinamica seguita. Possono inoltre essere compresi alcuni processi chimico-fisici, implicati nella differenziazione cellulare, studiando la dinamica di sviluppo di un organismo a cellule libere in cui un processo biologico è riprodotto con sostanze estratte dalle cellule.

IMMISSIONE SOSTANZE NUTRITIZIE
USCITA SOSTANZE NUTRITIZIE
CATETERE
TESSUTO RENALE
MESOZOI

Questo è il tubo a U utilizzato per creare l'habitat dei mesozoi in laboratorio. Il tessuto renale di polpo viene tenuto in vita in uno stretto tubo formato da una membrana dializzatrice che permette un flusso di liquido nutritizio (*in colore*). Questo tessuto secerne una varietà di sostanze nutrienti che diffondono, attraverso la membrana, nel tubo piú largo dove sono posti i mesozoi. Il catetere permette allo sperimentatore di effettuare prelievi di mesozoi per effettuare esperimenti e per regolarne il numero.

Gli organismi pluricellulari possono essersi evoluti in tre modi diversi: per divisione di un organismo cellulare in compartimenti, mediante lo sviluppo di una colonia di protozoi oppure attraverso la moltiplicazione e la differenziazione delle cellule derivate da un organismo unicellulare. Non è mai stato trovato un organismo che facesse pensare a una evoluzione avvenuta nel primo modo. Alcuni organismi, come le spugne e gli aggregati ameboidi, possono far pensare all'organizzazione di una colonia. Tutti gli altri organismi multicellulari conosciuti, compreso il piccolo gruppo dei mesozoi e quello enorme dei metazoi sembrano suggerire la terza ipotesi evolutiva.

Si ritiene attualmente che i mesozoi non siano una semplificazione secondaria dei vermi piatti, ma siano probabilmente imparentati con i protozoi ciliati. Da tempo si è ipotizzato che i protozoi flagellati siano gli antenati dei metazoi, perciò i mesozoi e i metazoi possono rappresentare due gruppi di organismi che si sono indipendentemente evoluti verso la pluricellularità seguendo lo stesso processo. Se è cosí, possiamo aspettarci di trovare qualcosa nella architettura molecolare delle cellule che rifletta un particolare tipo di sviluppo multicellulare? Possono i mesozoi darci una traccia per la comprensione dell'origine e dell'organizzazione dei metazoi?

Ricerche biologiche hanno sempre tentato di dimostrare una fondamentale identità nell'organizzazione biologica. Questo concetto è stato recentemente avvalorato dalla scoperta della universalità del codice genetico. Per di piú sono state viste delle similitudini tra gli enzimi che catalizzano processi energetici e di sintesi in parecchi organismi diversi. Ci sono perciò molte ragioni per credere che la scoperta dei principi del controllo dello sviluppo negli organismi semplici porterà alla comprensione dei processi di differenziazione cellulare e dello sviluppo negli animali piú evoluti. I fattori iniziali e finali che determinano lo sviluppo nei mesozoi possono essere identificati e manipolati fornendoci un adeguato sistema per lo studio dei meccanismi di controllo e di differenziazione cellulare. Concludendo, molte delle caratteristiche, siano esse semplici o speciali, dei mesozoi possono diventare utili per lo studio dei principi generali dell'organizzazione multicellulare.

Provette coniche usate per studiare gli effetti dell'affollamento sui mesozoi. Una sospensione di diciemidi che dovevano svilupparsi in individui vermiformi è stata divisa e messa in due diverse provette. Una è tenuta in posizione verticale permettendo la concentrazione dei diciemidi sul fondo, mentre l'altra è mantenuta in posizione quasi orizzontale impedendo la concentrazione degli organismi. In 24 ore i diciemidi mantenuti in condizioni di alta densità di popolazione cominciano a produrre individui infusoriformi che si riproducono sessualmente anziché individui vermiformi.

Il secondo esperimento prova che la scelta dei diciemidi tra i due tipi di riproduzione sessuale e asessuale, dipende dall'accumulo di un fattore « densità di popolazione ». Quando un'alta concentrazione di diciemidi viene incubata per 48 ore, si ha la produzione di molti individui infusoriformi. Quando questi vengono tolti e il liquido viene versato in un contenitore con diciemidi in condizioni di bassa densità di popolazione, si ha anche tra di essi, entro 24 ore, la produzione di individui infusoriformi.

Gli elettroni di conduzione nei metalli

Gli atomi e gli elettroni all'interno dei cristalli agiscono collettivamente e creano onde «quasiparticelle». Queste possono aiutarci a stabilire se un cristallo è isolante, semiconduttore, conduttore, o superconduttore

di M. Ya. Azbel', M. I. Kaganov e I. M. Lifshitz

La civiltà tecnologica moderna si basa sul sapiente sfruttamento delle proprietà degli elettroni nei metalli. Queste proprietà non determinano solamente le caratteristiche elettriche dei metalli ma virtualmente tutto il complesso di caratteristiche legate allo stato metallico.

Come le proprietà dei vari tipi di atomi differiscono a causa del diverso spettro di energie, allo stesso modo le differenze esistenti fra i metalli possono essere ricondotte ad analoghe differenze nella struttura energetica. Negli atomi e nelle molecole la struttura energetica è determinata dai livelli di energia occupati da singole particelle: gli elettroni. La meccanica quantistica spiega che le energie degli elettroni non possono assumere valori arbitrari ma solamente alcuni valori rigidamente determinati (*si veda la figura a pagina 37*). Anche nei metalli la struttura energetica è determinata da particelle, ma non da particelle che si comportano come negli atomi singoli. All'interno dei cristalli che costituiscono il metallo, quanti di energia sono associati ad atomi e a elettroni che agiscono collettivamente, producendo onde che si muovono attraverso l'intero cristallo. Questi quanti, che si comportano sotto molti aspetti come normali particelle, si indicano con il nome di quasiparticelle. Esse sono i portatori elementari di moto in un sistema di atomi interagenti. Solo nei gas le particelle costituenti (atomi e molecole) assolvono alle due funzioni di unità strutturali e di portatori di moto.

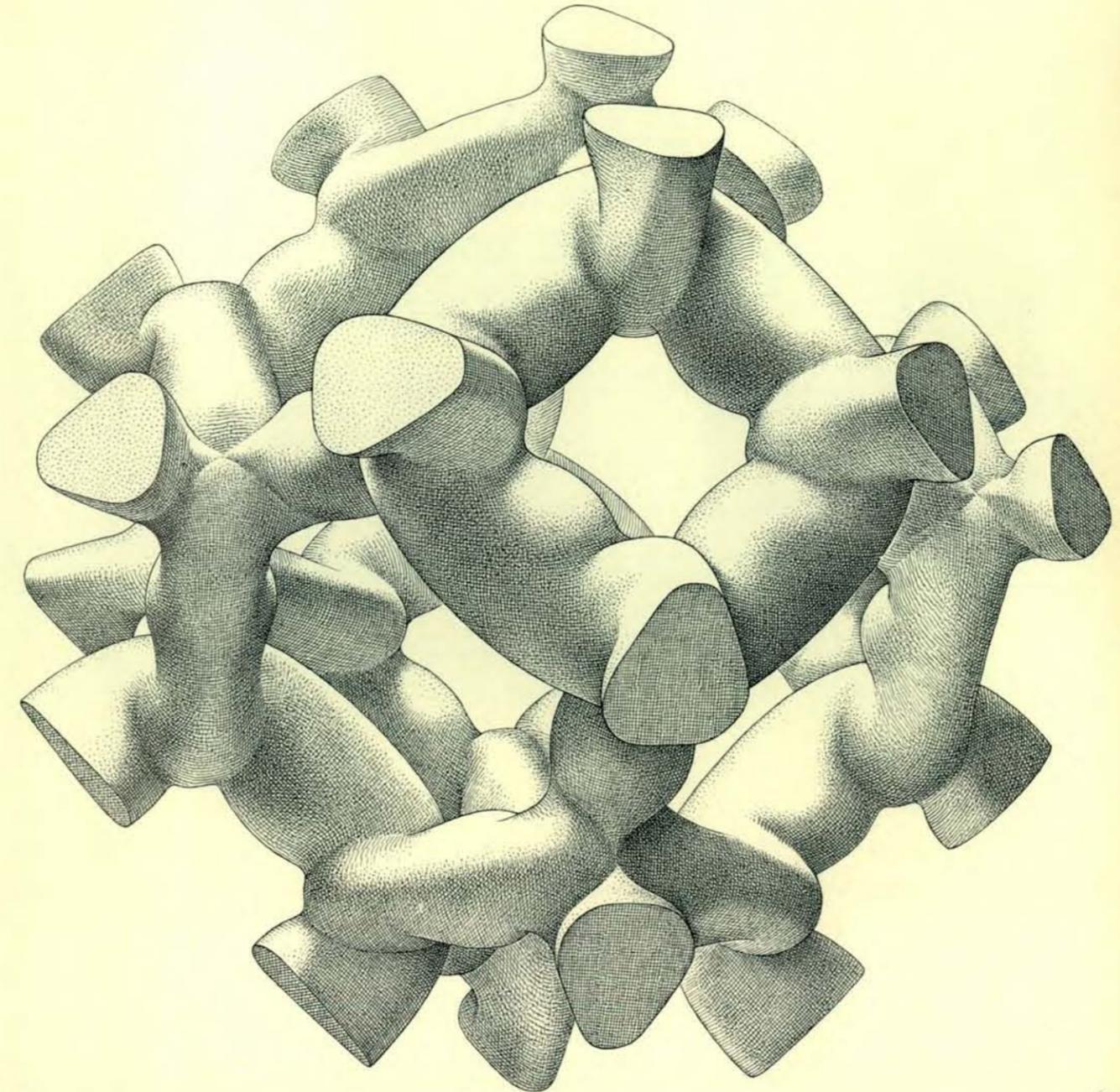
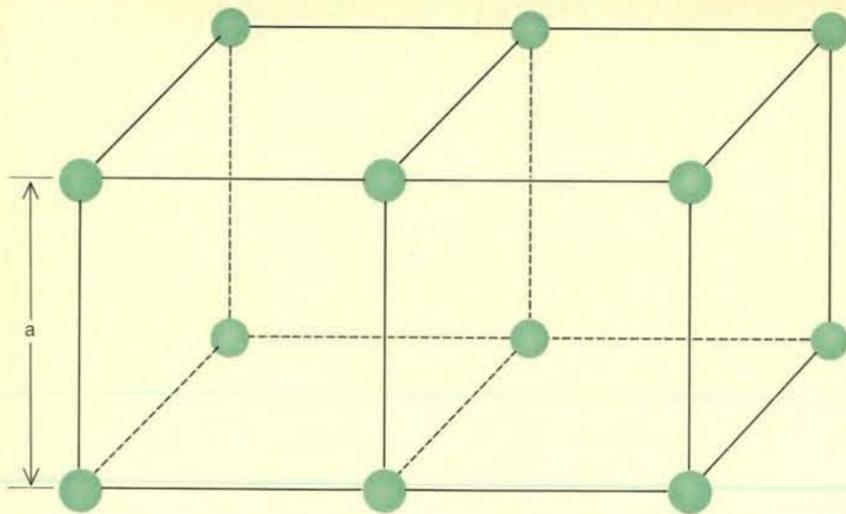
La natura delle quasiparticelle può apparire meno complicata se ci soffermiamo a considerare come è difficile comprendere a fondo la struttura energetica di un metallo, almeno in linea di principio. Come si può costruire una valida teoria del moto se ogni centimetro cubo di metallo contiene circa 10^{23} elettroni, che si muovono a elevata velocità e interagiscono non solo l'uno con l'altro ma anche con gli ioni (nuclei atomici privi di un adeguato complemento di elettroni) che costituiscono i centri di carica positiva regolarmente spaziati nel reticolo cristallino? È ovviamente impossibile descrivere il moto di ogni elettrone. Per fortuna ciò non è neppure necessario, dal momento che il nostro interesse è rivolto solo alle caratteristiche e alle proprietà del metallo cristallino nel suo complesso. Per fortuna, il comportamento medio di un aggregato è sempre molto piú facile da prevedere che non il comportamento di ciascuno dei suoi membri; questa è la base di ogni statistica, e in particolare della statistica applicata alla fisica.

Una proprietà fondamentale dei cristalli è che gli atomi che li costituiscono occupano le stesse posizioni in una struttura periodica e simmetrica; la piú piccola parte di questa struttura che si ripeta uguale a se stessa è indicata con il nome di cella (*si veda la figura in alto a pagina 36*). In ogni cella elementare gli atomi situati in posizioni omologhe godono di un identico intorno spaziale e perciò interagiscono nello stesso modo con ciascuno degli atomi vicini. Gli atomi in un cristallo possono essere visti come circuiti oscillanti accordati tutti sulla medesima frequenza e capaci di entrare in risonanza l'uno con l'altro. Qualunque eccitazione che interessa un atomo provoca perciò una analoga eccitazione negli atomi vicini. Ne risulta che l'eccitazione non può stabilizzarsi su una posizione ma si muove come un'onda attraverso l'intero cristallo. I moti connessi a queste onde si generano e si trasmettono solo in forma di pacchetti singoli, o quanti; questi quanti sono appunto le cosiddette quasiparticelle.

In un cristallo possono esserci diversi tipi di quasiparticelle, prodotte da diversi tipi di moti collettivi. Per esempio, le onde di vibrazione elastica nel cristallo generano quanti di suono che sono indicati con il nome di fononi. Le onde prodotte dalle oscillazioni dei momenti magnetici nei materiali ferromagnetici e antiferromagnetici (onde di spin) generano quasiparticelle note come magnoni. Le quasiparticelle che trasportano la carica elettrica nei metalli sono gli elettroni di conduzione. Sebbene la loro carica sia la stessa degli elettroni liberi, i portatori di carica sono tipiche quasiparticelle dotate di proprietà ben diverse da quelle degli elettroni liberi. La varietà delle proprietà dinamiche delle quasiparticelle è ancora piú grande della varietà di tipi esistenti. Nello studio delle quasiparticelle è molto importante possedere una marcata comprensione del tipo di dati che si devono acquisire e organizzare. Perciò dobbiamo tracciare ulteriori distinzioni fra quasiparticelle e particelle ordinarie.

Le particelle elementari che costituiscono la materia – elettroni, protoni, neutroni, fotoni, neutrini e cosí via – si trovano in uno spazio particolare: uno « spazio vuoto » che è omogeneo e isotropo (privo di proprietà dipendenti dalla direzione). Perciò, a dispetto delle molteplici differenze che si hanno nelle loro proprietà fondamentali, le particelle elementari mostrano un elevato grado di uniformità nelle proprietà dinamiche. Queste proprietà sono determinate dalla dipendenza della energia della particella, E, dalla quantità di moto, p, della particella stessa. Questa dipendenza è espressa nella legge di dispersione che, per ogni particella dotata di massa m e che si muova a una velocità sufficientemente bassa, è data dalla formula $E = p^2/2m$. La legge di dispersione è profondamente connessa con la geometria dell'universo, ovvero con l'omogeneità e l'isotropia dello spazio.

Il « vuoto » in cui si trovano le quasiparticelle è molto piú complesso: gli atomi che giacciono in punti ben determinati del reticolo cristallino rendono lo spazio inomogeneo e anisotropo (cioè dotato di proprietà dipendenti dalla direzione). Ciò complica fortemente la relazione fra energia e quantità di moto di un quanto. Il primo gradino nella spiegazione dello spettro di energie di un cristallo è quindi costituito dalla determinazione della legge di dispersione per le quasiparticelle. Si potrebbe tentare di calcolare la legge di dispersione; le forze principali che agiscono fra le particelle (fra elettroni e ioni e fra elettroni ed elettroni) sono infatti note, e pure sono state stabilite le leggi fondamentali che regolano il moto di particelle atomiche. I calcoli sono però cosí pesanti che occorre introdurre ipotesi semplificatrici.

Si è anche tentato un approccio che offre in genere piú probabilità di successo: far sí che la teoria sia guidata dai risultati sperimentali. Partendo dai concetti piú generali della meccanica quantistica, i fisici hanno costruito una teoria matematica di quei fenomeni che avvengono nei cristalli e delle proprietà dei cristalli che sono sensibili alla struttura energetica del cristallo stesso e in particolare alla legge di disper-

La superficie di Fermi è una superficie immaginaria tridimensionale che rappresenta il moto e le energie degli elettroni in un metallo. Piú precisamente, una superficie di Fermi è una superficie nello spazio della quantità di moto al di sotto della quale tutti gli stati elettronici di un cristallo risultano occupati alla temperatura dello zero assoluto e al di sopra della quale essi sono tutti liberi. Questo disegno rappresenta una parte (la « terza zona ») della superficie di Fermi del piombo metallico.

Gli atomi nei cristalli sono disposti secondo un preciso ordinamento tridimensionale. I cristalli piú semplici sono caratterizzati da celle unitarie di forma cubica. La distanza fra gli atomi vicini in un cristallo (*a*) varia normalmente da uno a cinque angstrom.

sione per le quasiparticelle. Paragonando le previsioni della teoria con i risultati sperimentali è possibile ricostruire la struttura energetica dei cristalli partendo dalle leggi di dispersione.

Consideriamo in maggior dettaglio cosa si intenda per struttura energetica di un cristallo. Il termine « struttura » è particolarmente appropriato; infatti lo spettro di energie viene descritto con l'ausilio di immagini geometriche.

Le figure geometriche sono piuttosto difficili da interpretare poiché le costruzioni non si trovano nello spazio ordinario ma nello spazio della quantità di moto, dove ogni punto non corrisponde a una coordinata geometrica della particella bensí alla sua quantità di moto. Quindi dobbiamo passare momentaneamente allo spazio della quantità di moto. Per costruire le strutture energetiche introduciamo dapprima una sorta di supporto strutturale. Lo scopo è raggiunto separando lo spazio in celle identiche dotate di dimensioni inversamente proporzionali a quelle delle celle del cristallo le cui proprietà stiamo cercando di descrivere (*si veda la figura in basso in questa pagina*). Per essere rigorosi dovremmo mostrare come lo stato di una quasiparticella in un cristallo è caratterizzato non dalla quantità di moto ma da una grandezza del tutto simile: la « quasiquantità di moto ». Da un punto di vista strettamente teorico un cristallo può essere rappresentato da una singola cella, dal momento che tutte le grandezze che dipendono dalla quasiquantità di moto sono funzioni periodiche con periodo pari a una cella; l'esperienza ha però dimostrato che risulta piú conveniente l'uso di uno spazio infinito, in cui si possa tener conto direttamente della periodicità.

L'energia di una quasiparticella in un cristallo è rappresentata da una complessa funzione periodica della sua quasiquantità di moto. Questa funzione viene abitualmente tracciata nel modo seguente: si congiungono con una superficie tutti i punti dello spazio della quantità di moto in cui l'energia eguaglia un certo valore predeterminato. Superfici isoenergetiche del tutto simili vengono tracciate anche per altri valori dell'energia. Per un elettrone nello spazio libero le superfici isoenergetiche sono costituite da sfere il cui raggio aumenta proporzionalmente alla radice quadrata dell'energia. In un cristallo il modo in cui varia la forma della superficie a seconda dell'energia determina la legge di dispersione per le quasiparticelle.

Quando il cristallo si trova nello stato fondamentale (cioè allo zero assoluto), non ci sono moti di vibrazione regolari e perciò nemmeno quasiparticelle. Esse appaiono quando si introduce energia nel cristallo: quando si riscalda il cristallo o lo si espone alla luce oppure lo si bombarda con particelle. Le proprietà statistiche dell'aggregato di quasiparticelle sono strettamente connesse con le condizioni che caratterizzano la loro comparsa (creazione) o scomparsa (annichilazione). Le quasiparticelle appaiono e scompaiono sia singolarmente sia a coppie: quelle che possono apparire singolarmente sono descritte dalla statistica di Bose-Einstein e perciò vengono dette bosoni; quelle che possono apparire solo a coppie seguono la statistica di Fermi-Dirac e vengono indicate con il nome di fermioni.

Fononi e magnoni sono tipici esempi di quasiparticelle che sono bosoni. Poiché i bosoni possono apparire e scomparire singolarmente, la loro legge di dispersione può essere direttamente misurata applicando le leggi di conservazione dell'energia e della quantità di moto. Il metodo piú usato per investigare la parte dello spettro di energia dei cristalli dovuta ai bosoni è quello di bombardare un cristallo con neutroni e di osservare la relazione fra quantità di moto ed energia trasferite al cristallo e quantità di moto ed energia perdute dai neutroni (fenomeno questo noto con il nome di diffusione anelastica). La quantità di moto e la energia assorbite dal cristallo vanno a finire nella creazione dei bosoni.

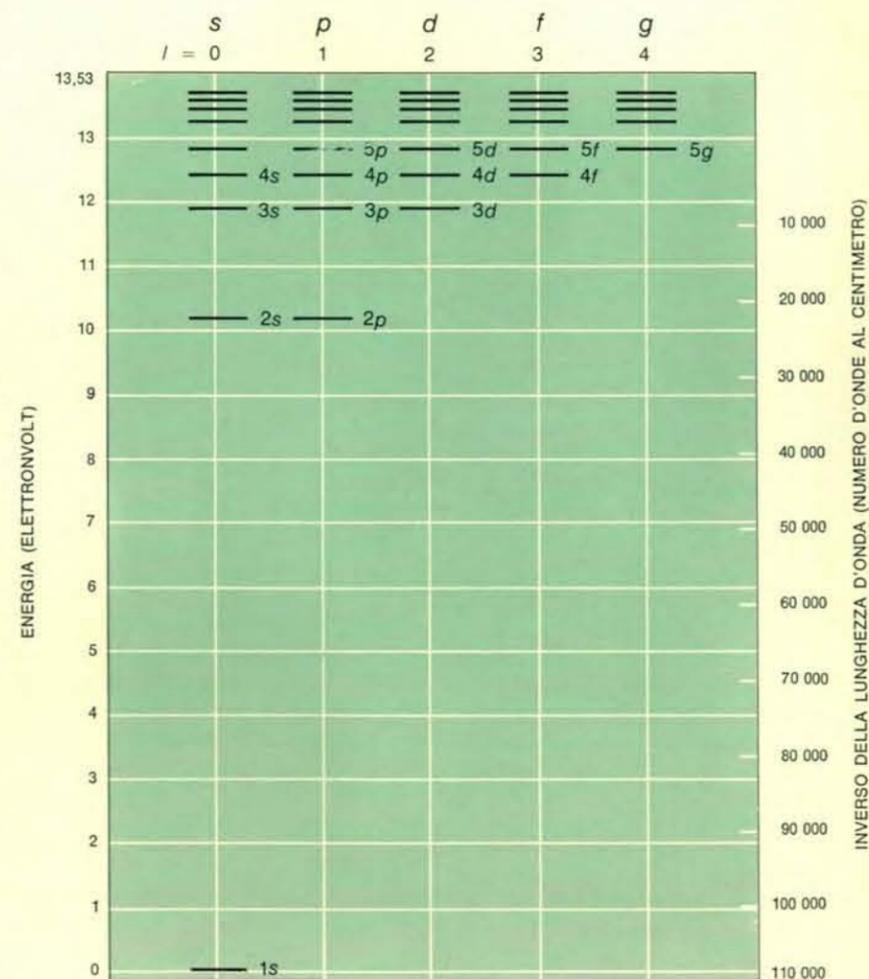
Per poter discutere la struttura energetica dei cristalli bisogna utilizzare il concetto di spazio della quantità di moto. Nello spazio della quantità di moto le celle di un cristallo sono caratterizzate da dimensioni inversamente proporzionali a quelle relative al cristallo reale. Perciò una cella di dimensione *a* viene trasformata nello spazio della quantità di moto in una cella con lato pari a *h/a*, dove *h* è la costante di Planck.

I fermioni sono creati principalmente dal moto degli elettroni all'interno del cristallo. Da questo punto in avanti limiteremo il nostro discorso a queste quasiparticelle cariche. Le proprietà elettroniche dei cristalli sono connesse, tuttavia, non solo al moto delle quasiparticelle ma anche alla natura dello stato fondamentale del cristallo: il « vuoto » in cui le quasiparticelle vengono create e si muovono. In fisica quantistica lo stato fondamentale non è uno stato di totale immobilità o di mancanza di movimento, ma solo una particolare forma di « ordine zero » in cui non ci sono quasiparticelle. A una temperatura sufficientemente bassa tutti i cristalli, a seconda del tipo di stato elettronico fondamentale, possono essere divisi in quattro classi: dielettrici (isolanti), semiconduttori, metalli caratterizzati da una normale conducibilità e superconduttori.

Lasciando da parte il caso particolare dei superconduttori, cercheremo di descrivere, utilizzando un modello fortemente semplificato, lo stato elettronico fondamentale del cristallo spiegando in tal modo perché certe sostanze (i metalli) conducono la corrente quando si trovano nei pressi di questo stato mentre altre (i dielettrici) non lo fanno. In tutti i materiali non superconduttori tutte le conseguenze qualitative di questo modello restano valide per ogni sostanza esaminata e spiegano in modo corretto l'essenza del fenomeno.

Nello spazio libero lo stato di un elettrone è completamente determinato dalla sua quantità di moto; in un cristallo ciò non avviene. Allo scopo di caratterizzare lo stato di un elettrone in un cristallo è necessario infatti specificare oltre alla quantità di moto un certo numero intero noto come numero di banda. Per ogni numero di banda occorre introdurre un diverso spazio della quantità di moto per costruire le superfici isoenergetiche. Se ci chiediamo quali valori di energia può assumere un elettrone in un cristallo, troviamo che sono permessi soltanto certi intervalli di energia e che questi intervalli sono separati da bande proibite (*si veda la figura in alto a pagina 39*). Ogni intervallo permesso corrisponde a un ben determinato numero di banda e prende il nome dalla banda stessa. Le bande di energia permesse del cristallo scaturiscono come conseguenza diretta dei livelli di energia permessi per l'elettrone nell'atomo. Le bande possono sovrapporsi, ma anche in questo caso esse conservano la loro individualità per il fatto che ogni banda è caratterizzata dal proprio spazio della quantità di moto.

Adesso riempiamo lo spazio della quantità di moto relativo alla banda *n*-esima con elettroni veri e propri, che sono sempre presenti nel cristallo, e non con quasiparticelle. Ovviamente, nello stato fondamentale, gli elettroni occupano lo stato a piú bassa energia. Come stabilisce il principio di esclusione di Pauli, in ogni stato non possono però coesistere piú di due elettroni. Perciò una cella dello spazio della quantità di moto è completamente riempita da un numero di elettroni pari esattamente al doppio del numero delle celle del cristallo reale. Riempire di elettroni questa sola cella dello spazio della quantità di moto equivale a riempire tutto lo spazio, significando ciò che tutti gli stati nella banda sono occupati.

Se tutte le bande di energia permesse in un cristallo nello stato fondamentale sono o piene o vuote, il cristallo è un dielettrico, cioè un isolante; se invece una o piú bande permesse so-

La struttura elettronica di un atomo è rappresentata dai livelli di energia che i suoi elettroni sono in grado di occupare. Secondo la teoria quantistica i livelli possono assumere solo valori discreti. La struttura elettronica illustrata in questa figura è quella dell'atomo di idrogeno. Al crescere dell'energia i livelli permessi risultano sempre piú prossimi l'uno all'altro. Quando l'energia dell'elettrone supera i 13,53 elettronvolt, tuttavia, l'elettrone non può piú essere trattenuto dalla carica positiva presente nel nucleo e sfugge alla sua attrazione. Mentre il momento della quantità di moto, *l*, dell'elettrone aumenta a intervalli interi, l'energia minima salta ogni volta di un livello piú in alto. Passando dal piú alto livello di energia al livello zero, un elettrone emette radiazione ultravioletta con una lunghezza d'onda di 916 angstrom, che corrisponde quasi esattamente a 110 000 onde al centimetro, come si vede nella scala a destra.

no solo parzialmente riempite, il cristallo non solo è un conduttore ma anche un metallo (*si veda la figura in basso nella pagina a fronte*). Il fluire della corrente attraverso un conduttore metallico è un processo complicato in cui gli elettroni guadagnano pacchetti infinitesimali di quantità di moto come risultato della forza esercitata dal campo elettrico; essi perdono poi questa quantità di moto quando collidono con le irregolarità del reticolo cristallino. Tutto il processo risulta però impossibile quando le bande permesse sono completamente riempite di elettroni; il principio di esclusione vieta infatti agli elettroni di raggiungere una nuova posizione nella banda, mentre l'esistenza delle bande proibite esclude la possibilità di qualsiasi interazione fra gli elettroni di piú elevata energia e il campo elettrico. Nei metalli, d'altra parte, l'energia può essere trasportata dagli elettroni caratterizzati da un'energia vicina a quella massima nella banda; infatti questi elettroni sono liberi di occupare stati vacanti di energia un po' piú alta.

L'energia al di sotto della quale tutti gli stati elettronici sono occupati allo zero assoluto e al di sopra della quale sono vuoti è nota con il nome di energia di Fermi; la corrispondente superficie nello spazio della quantità di moto è indicata con il nome di superficie di Fermi. Un metallo nello stato fondamentale può quindi essere rappresentato da un recipiente dalla forma bizzarra completamente riempito di elettroni. Nello stato fondamentale non ci sono elettroni al di fuori di questo recipiente.

Ora che abbiamo descritto lo stato fondamentale del metallo, siamo pronti a domandarci: con quale meccanismo si incrementa l'energia degli elettroni nei metalli? In che modo si creano le quasiparticelle? L'energia può essere incrementata solo spostando almeno un elettrone da sotto la superficie di Fermi verso la regione dello spazio della quantità di moto che è priva di elettroni. Quando si compie questa operazione, si crea nella banda di energia precedentemente piena un « buco », ovvero uno spazio vuoto. Il buco può essere considerato come l'antiquasiparticella dell'elettrone appena « creato ». Descrivendo il buco come un'antiparticella mettiamo in risalto la possibilità dell'annichilazione occorrente fra buco ed elettrone; quando l'elettrone ritorna « al suo posto », il metallo torna nello stato fondamentale e due quasiparticelle – un buco e un elettrone – spariscono.

Quando si aumenta la temperatura nei dielettrici, un piccolo numero di elettroni acquista un'energia sufficiente a sfuggire da una banda piena verso una vuota, attraversando in questo processo una banda proibita; come avviene nei metalli, per ogni elettrone resta un buco nella banda inferiore. In taluni cristalli la banda proibita che separa la banda piena da quella libera risulta molto sottile, cosicché a temperature ordinarie parecchi elettroni sono in grado di spostarsi nella banda libera e divenire cosí portatori di carica insieme ai buchi che sono rimasti nella banda inferiore. Questi cristalli sono i cosiddetti semiconduttori, dei quali il germanio e il silicio, usati nei transistor, sono gli esempi meglio conosciuti. Nei metalli che sono buoni conduttori anche un notevole aumento della temperatura produce un piccolo cambiamento nella distribuzione degli elettroni nello spazio della quantità di moto. Per questo motivo la superficie di Fermi e il suo intorno piú prossimo – la regione di spazio in cui possono esistere le quasiparticelle (buchi ed elettroni) – acquistano una importanza fondamentale.

Per trovare la variazione dell'energia delle particelle causata, per esempio, da un aumento della temperatura, bisogna moltiplicare la velocità delle particelle per la variazione della quantità di moto. Un'adeguata analisi dello spettro di energie degli elettroni, sufficiente per una descrizione esauriente delle proprietà dei metalli, richiede la determinazione della forma della superficie di Fermi e delle velocità degli elettroni sui punti della superficie stessa. Le superfici di Fermi particolarmente complesse sono indicate talvolta con il nome di « mostri ». Se sulla superficie di Fermi si rappresenta anche la velocità degli elettroni, la figura che ne risulta è quella di un mostro con frecce che si proiettano all'esterno (*si veda la figura a pagina 40*).

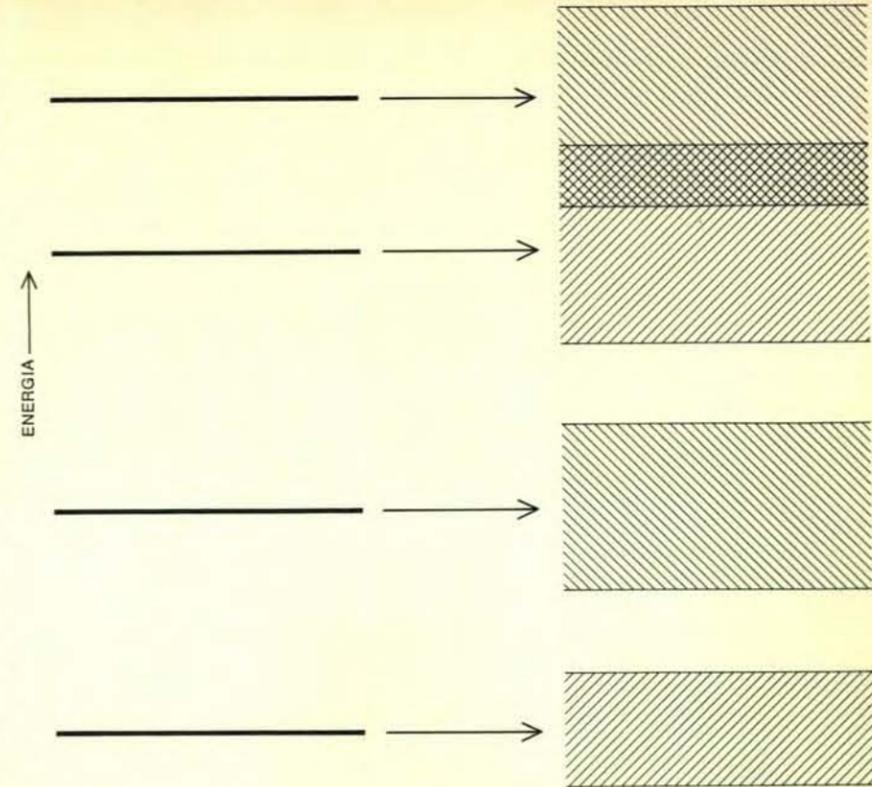
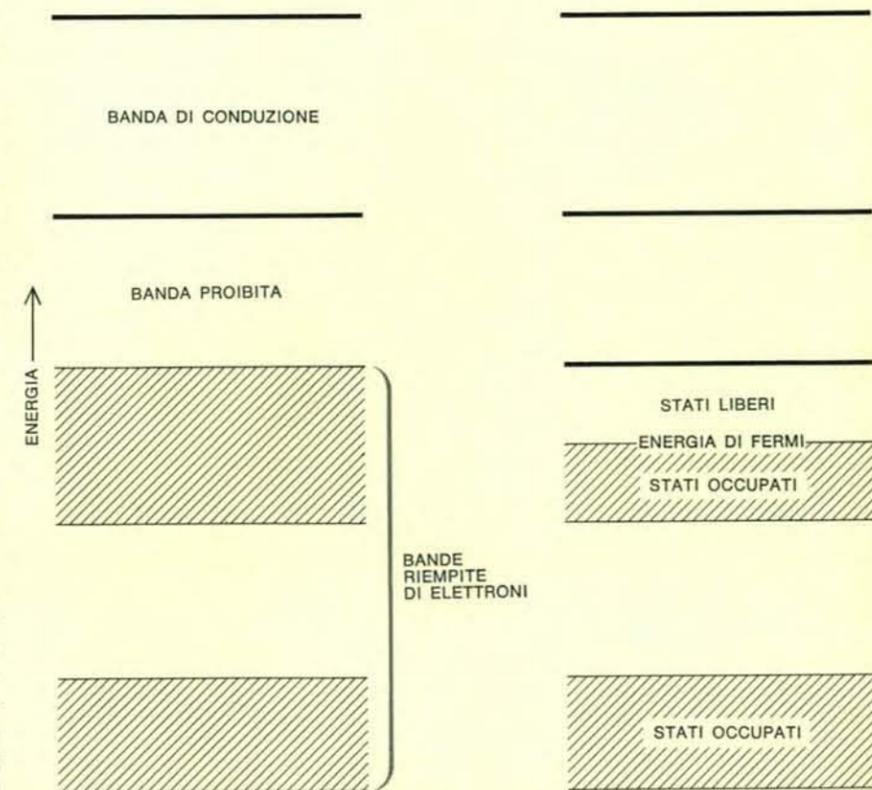
Poiché i buchi e gli elettroni, come tutti i fermioni, appaiono e scompaiono a coppie, non si può determinare con precisione la legge di dispersione per gli elettroni nei metalli facendo uso di metodi del tipo della diffusione anelastica dei neutroni. Il motivo è che le equazioni che determinano la variazione di energia e di quantità di moto della particella diffusa contengono un numero di incognite troppo elevato, cioè le energie e le quantità di moto sia dell'elettrone sia del buco. Risultò pertanto necessario lo sviluppo di metodi differenti atti a determinare le leggi di dispersione degli elettroni, basati principalmente sulle particolari caratteristiche della meccanica degli elettroni di conduzione.

La meccanica delle quasiparticelle con una complicata legge di dispersione è unica, e il loro moto nei campi esterni è di solito completamente diverso dal moto dei loro « antenati »: gli elettroni nello spazio libero. Per esempio, dal fatto che l'energia è una funzione periodica della quantità di moto segue che la particella è costretta a compiere oscillazioni in un campo elettrico costante e uniforme, anziché partire verso l'infinito come ci si dovrebbe aspettare (*si veda la figura in alto a pagina 42*). Sebbene questo esempio metta in luce nel modo corretto il carattere unico del moto delle quasiparticelle, esso è forse troppo idealizzato; non abbiamo infatti preso in considerazione le collisioni fra gli elettroni e le deformazioni presenti nel reticolo cristallino, in particolare quelle inevitabili dovute ai moti termici degli ioni che lo compongono. Nelle condizioni reali che si verificano nei buoni conduttori l'influenza del campo elettrico sul moto delle cariche è piccola perché risulta impossibile produrre un campo elettrico molto intenso; se si cerca di produrre un campo piuttosto forte, la quantità di calore sviluppato porta alla fusione del metallo.

Il caratteristico moto delle quasiparticelle fa sorgere due problemi strettamente connessi: come questo moto influisca sulle proprietà elettriche dei metalli, e come sia possibile in generale analizzare la dinamica degli elettroni di conduzione, ovvero la loro legge di dispersione. L'ultimo problema può ovviamente essere risolto solo in stretta connessione con il primo. Dopo tutto, è impossibile già in linea di principio estrarre le quasiparticelle dal cristallo per studiarne le proprietà, dal momento che esse rappresentano una eccitazione collettiva che interessa tutto il cristallo. Il metodo piú naturale, come già abbiamo detto, è quello di stabilire teoricamente la connessione fra la dinamica degli elettroni di conduzione (legge di dispersione) e le diverse proprietà macroscopiche (elettriche e magnetiche) del metallo e quindi di utilizzare le misure sperimentali di queste proprietà come indicative dello spettro elettronico. Un approccio di questo tipo verso la soluzione del problema dello spettro di energie degli elettroni nei metalli è stato sviluppato a partire dal 1950 da un gruppo di fisici teorici presso l'Istituto Kharkov delle basse temperature nell'URSS.

Si scoprí che le proprietà di un metallo piú intimamente connesse con la legge di dispersione sono anche quelle che variano sotto l'influenza di un forte campo magnetico. La traiettoria degli elettroni di conduzione in un campo magnetico costante è determinata dalle curve ricavate come intersezione della superficie di Fermi con il piano perpendicolare alla direzione del campo magnetico (*si veda la figura in alto a pagina 41*). La direzione del moto è determinata a seconda che l'area racchiusa dall'intersezione aumenti o diminuisca all'aumentare dell'energia: se l'area dell'intersezione aumenta (*si veda la curva « a » nella figura in basso a pagina 41*), la quasiparticella allora si muove nella stessa direzione di un elettrone libero; se l'area diminuisce (*curva « b »*), essa si muove nella direzione opposta, ovvero nella direzione che sarebbe seguita da una carica positiva.

Nel caso di una superficie di Fermi chiusa, il carattere del moto è lo stesso per tutte le quasiparticelle che si trovano su tale superficie e non dipende dalla direzione del campo magnetico. Tutte le quasiparticelle si muovono o come normali cariche negative (se la superficie si « gonfia » all'aumentare dell'energia) o come normali cariche positive (se la superficie si « contrae » all'aumentare dell'energia). Nel caso di un elettrone di conduzione un'inversione del senso di rotazione, in conseguenza del tipo della superficie di Fermi, viene descritta comunemente non per mezzo del cambiamento del segno della carica ma per mezzo dell'inversione del segno della massa elettronica. Seguendo questa convenzione si assegna una massa negativa a un elettrone che sta ruotando inversamente alla sua direzione normale. Se la legge di dispersione è particolarmente complessa, la massa non funziona piú in questo suo ruolo universale e parecchie altre grandezze, oltre alla massa, cominciano a fare la loro comparsa in diversi fenomeni. Perciò il coefficiente di proporzionalità fra forza e accelerazione non è piú uguale a quello fra quantità di moto e velocità. Quando un elettrone si muove su un'orbita chiusa, il periodo che compete al suo moto è espresso con la stessa formula che vale per una carica libera, se si ha l'accortezza di sostituire la massa della particella libera con quella che viene chiamata massa efficace. La massa efficace è determinata dalla rapidità di cambiamento dell'area intersezione in funzione dell'energia e se l'intersezione diminuisce al crescere dell'energia questa massa risulta negativa.

Se la superficie di Fermi non è chiusa, il carattere del moto della carica dipende fortemente dalla direzione del

I livelli di energia degli elettroni in un cristallo diventano ampie bande (*a destra*) che possono essere separate da bande proibite oppure possono sovrapporsi. Le bande di energia permesse possono essere viste come la somma dei livelli di energia permessi.

I conduttori e i nonconduttori si distinguono dal modo in cui sono occupate le bande. In un nonconduttore (*a sinistra*), le bande possono essere sia del tutto piene sia completamente vuote quando il cristallo si trova nel suo stato fondamentale. In un metallo (*a destra*), una o piú bande di energia risultano solo parzialmente riempite di elettroni.

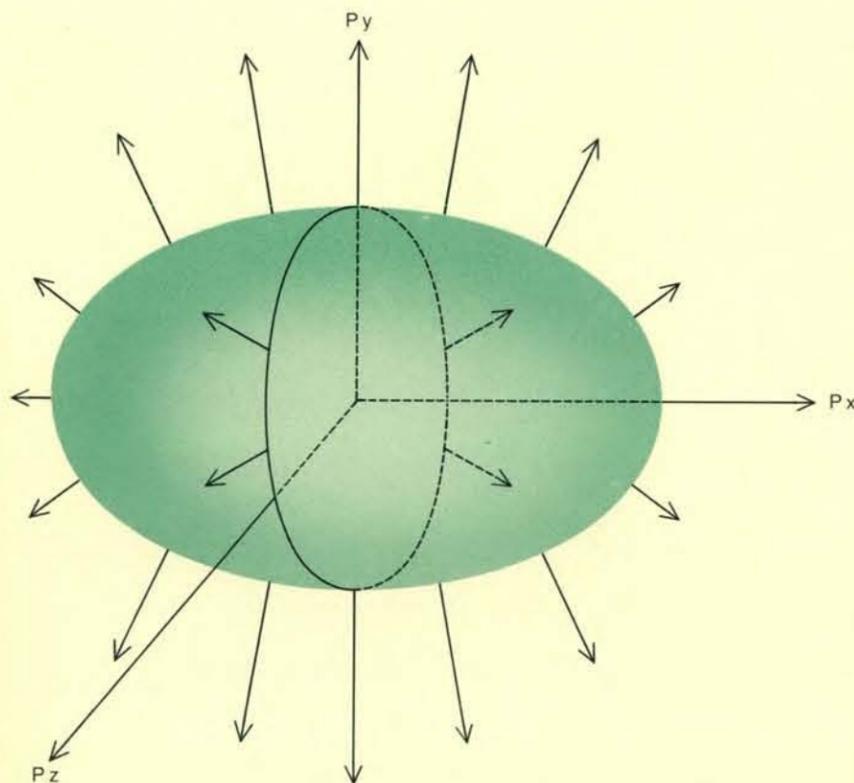
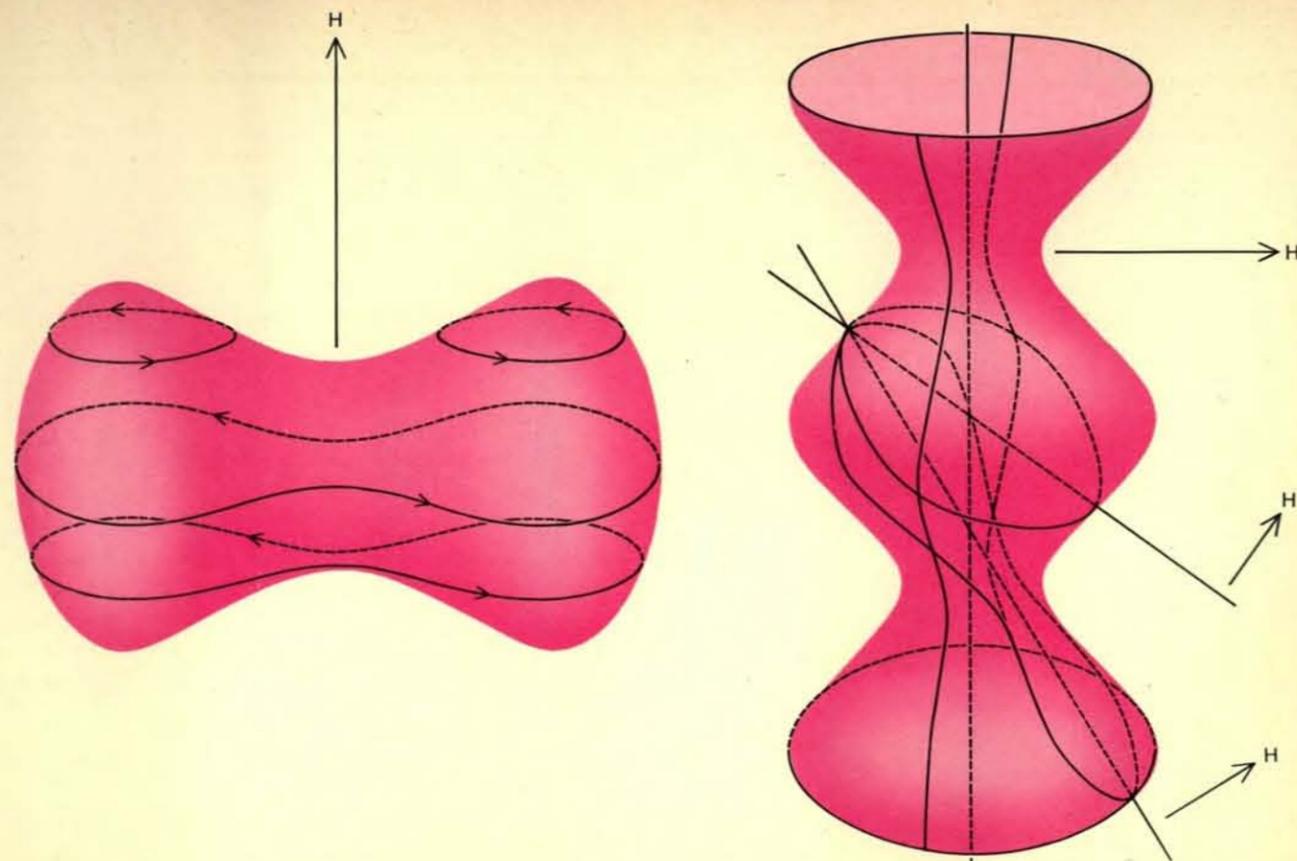
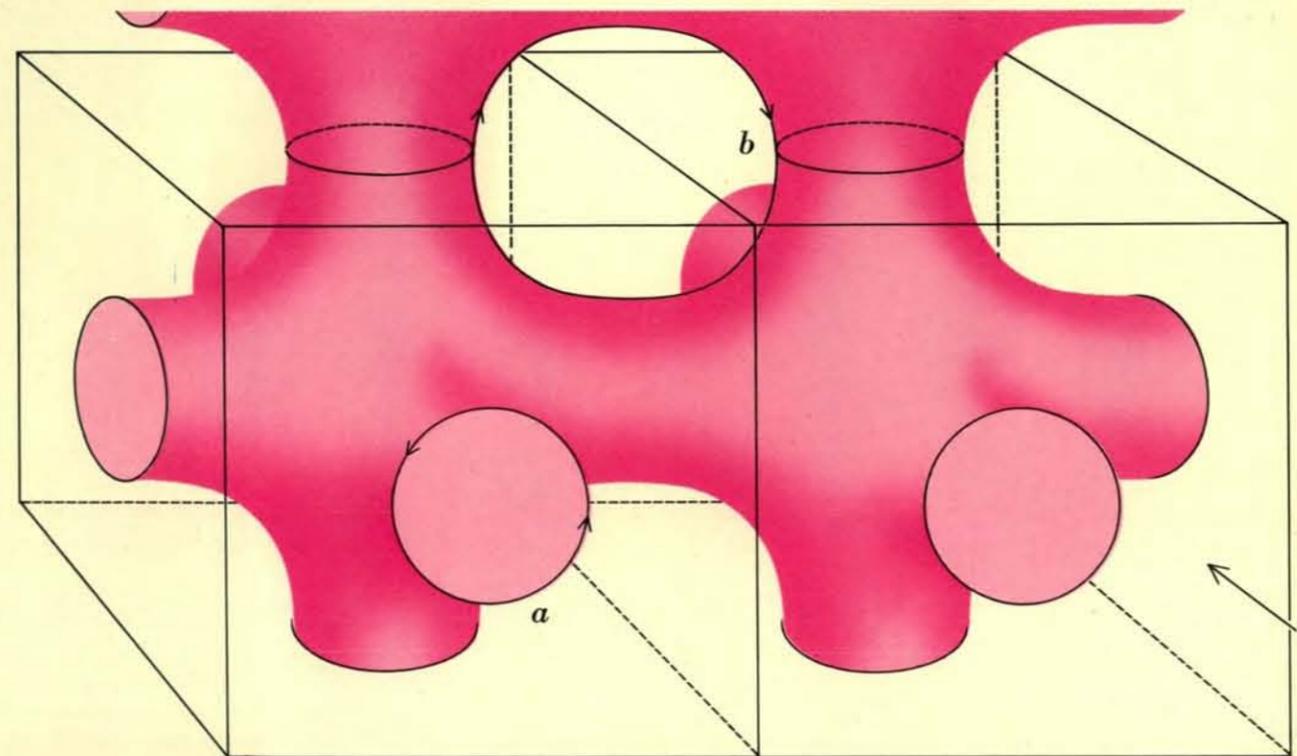
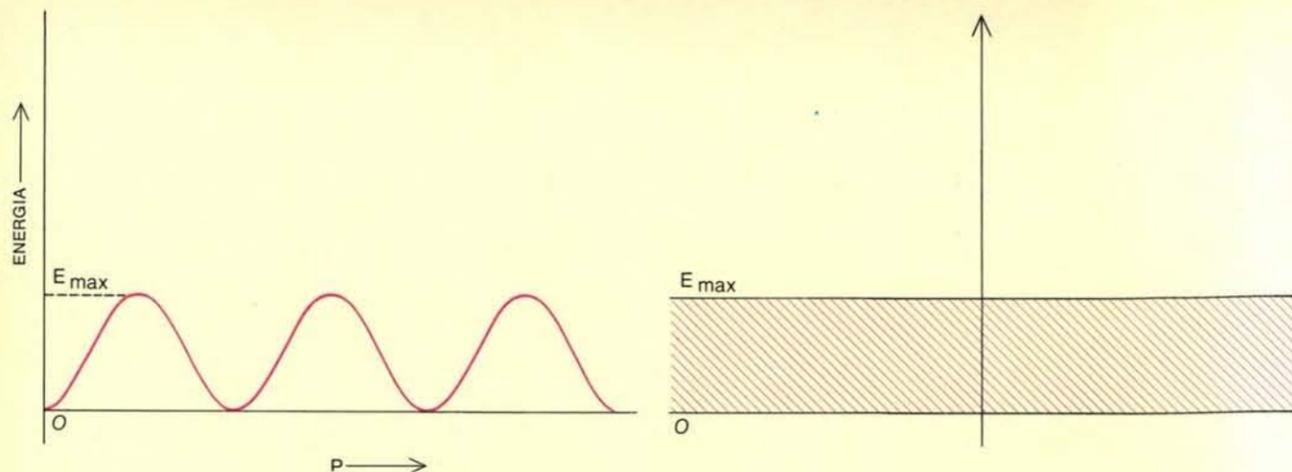
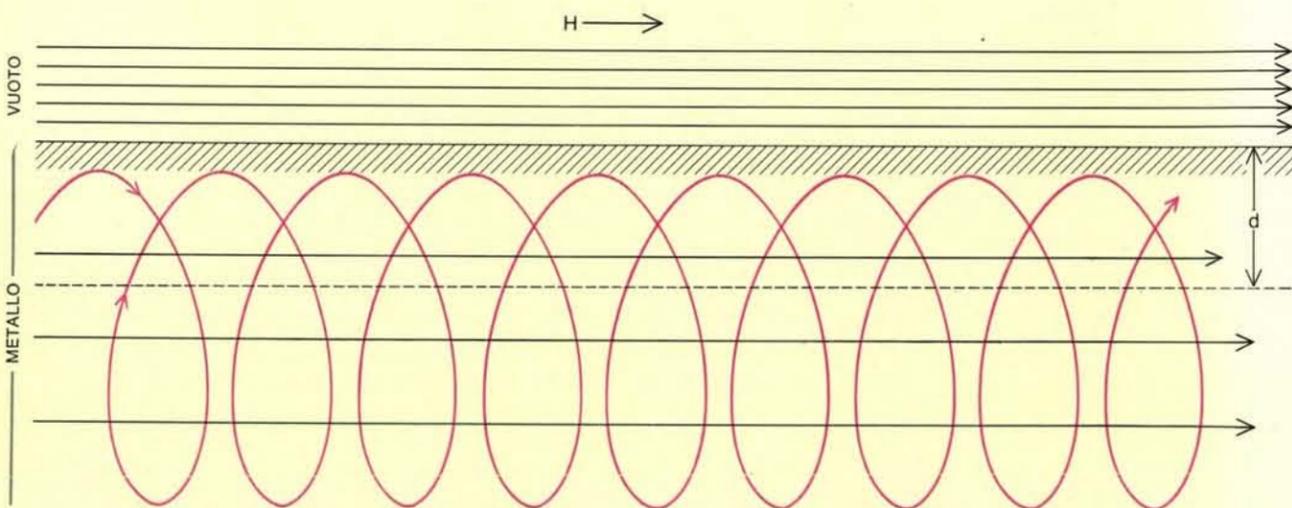
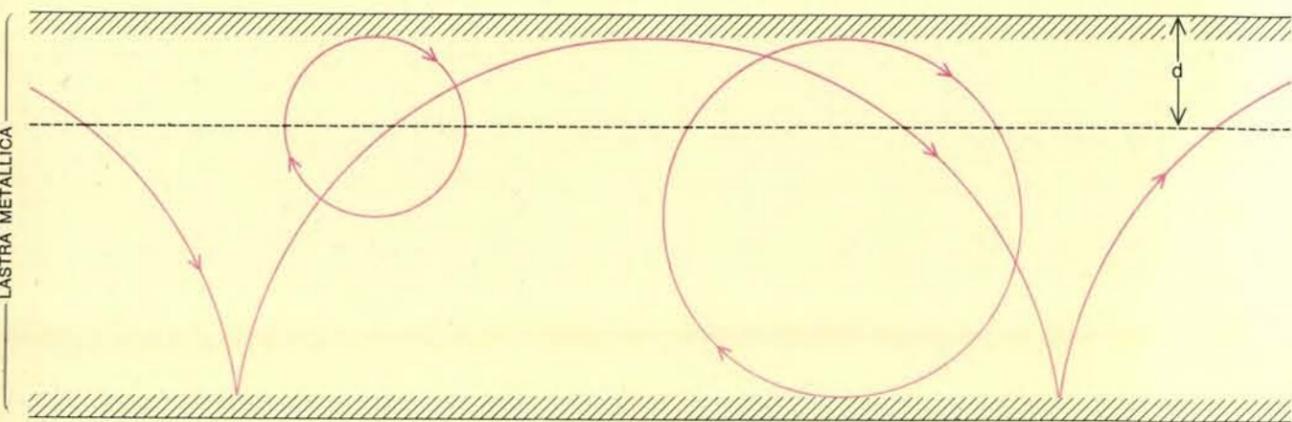
campo magnetico. Per le intersezioni chiuse il moto rimane periodico; tuttavia la direzione del moto dell'elettrone dipende essenzialmente sia dall'orientazione del campo magnetico sia dalla posizione del piano di intersezione. Se dunque l'orbita è aperta (*si veda la parte a destra della figura in alto nella pagina a fronte*), il moto nella direzione corrispondente risulta in generale aperiodico, e la carica va all'infinito. Da tutto ciò segue che, quando un elettrone di conduzione si muove in un campo magnetico costante, la sua traiettoria è strettamente connessa con le principali caratteristiche della quasiparticella: cioè con la sua legge di dispersione.

Naturalmente, se la descrizione proposta deve essere piú di una semplice idealizzazione, è necessario che il carattere del moto lungo l'orbita abbia il tempo di stabilizzarsi, e che le quasiparticelle non vengano « deviate fuori strada » in conseguenza delle collisioni. In altre parole, le collisioni devono essere abbastanza rare. Questo significa che il periodo del moto nel campo magnetico dovrebbe essere notevolmente piú corto dell'intervallo di tempo relativo al cammino libero: l'intervallo medio fra due collisioni successive. Dato che il periodo di rivoluzione dell'elettrone è inversamente proporzionale all'intensità del campo, questa deve essere sufficientemente elevata. Per lo stesso motivo è auspicabile avere il periodo del cammino libero piú lungo possibile, la qual cosa implica che l'esperimento deve essere effettuato con campioni della piú elevata purezza e a temperature le piú basse possibile. (Infatti quanto piú bassa è la temperatura, tanto piú deboli risultano le vibrazioni termiche casuali che interrompono l'ideale periodicità del cristallo.) Tutte queste condizioni sono soddisfatte abbastanza facilmente in campi magnetici che abbiano un'intensità dell'ordine di 1000 oersted.

Come possiamo verificare il moto della quasiparticella sulla sua orbita in un esperimento reale? Come è possibile « vedere » il suo moto dentro il cristallo? Risulta appropriata in questo caso un'analogia con il meccanismo della visione ordinaria. Quando vediamo un certo oggetto, ciò significa da una parte che l'oggetto interagisce con i raggi di luce in modo tale da alternarne la distribuzione e, d'altra parte, che l'interazione con la luce è cosí debole da non influire praticamente sullo stato dell'oggetto stesso.

Nello studio degli elettroni di conduzione si possono usare diversi tipi di « raggi luminosi »: onde radio ad altissima frequenza, ultrasuoni e persino una corrente stazionaria che scorre attraverso il campione. Descriviamo ora i metodi maggiormente « grafici »: quelli connessi ai fenomeni galvanomagnetici e alla risonanza ciclotronica.

I fenomeni galvanomagnetici sono associati al flusso di una corrente continua attraverso un conduttore immerso in un campo magnetico costante. La corrente che scorre in una data direzione risulta proporzionale alla lunghezza del percorso lungo il quale la carica acquista energia a spese del campo elettrico. Poiché il campo magnetico fa « avvolgere » le cariche, esso permette loro di muoversi su un piano che rimane perpendicolare al campo, ma solo per metà circa del ciclo di rivoluzione delle cariche e non per tutto il cammino libero. In conseguenza di ciò la resistenza elettrica in un campo particolarmente intenso risulta essere fortemente dipendente dal carattere delle orbite elettroniche e pertanto dalla legge di dispersione degli elettroni. Se fosse possibile sintetizzare dei metalli « ideali » – metalli in cui gli elettroni abbiano un periodo di cammino libero infinito – essi presenterebbero una conducibilità infinita in assenza del campo magnetico. In un campo magnetico questa proprietà è caratteristica di tutti i metalli, ma solo se il campo magnetico è parallelo alla corrente. Se invece il campo magnetico è perpendicolare alla corrente, taluni metalli ideali diventano dielettrici ideali con una resistenza infinita.

Altri metalli (per esempio quelli caratterizzati da superfici di Fermi aperte) sono sensibili non solo all'orientamento del campo magnetico rispetto alla corrente ma anche alla direzione del campo magnetico rispetto agli assi principali del cristallo. Esistono direzioni del campo magnetico per le quali il metallo è un conduttore ideale, e altre direzioni per le quali esso si comporta come un dielettrico ideale. Nelle condizioni reali questo significa che, a seconda della direzione del campo magnetico, la resistenza può cambiare centinaia di migliaia o milioni di volte. Analizzando sperimentalmente la dipendenza della resistività dal campo magnetico possiamo non solo stabilire la « direzione di apertura » delle traiettorie delle cariche ma anche spiegare molte altre proprietà della legge di dispersione. Un'analisi comparativa dei

Una semplice superficie di Fermi è costituita da un ellissoide. Una superficie di tipo piú complicato è illustrata a pagina 35. Nello stato fondamentale tutti gli elettroni di un cristallo sono contenuti all'interno dell'involucro di Fermi. I vettori velocità degli elettroni sulla superficie possono essere rappresentati da frecce, o aghi, allo scopo di illustrare come vari la « pressione » al di sotto dello strato di Fermi.

Le traiettorie degli elettroni con una complicata legge di dispersione in un campo magnetico costante, *H*, dipendono fortemente dalla forma della superficie isoenergetica, la quale è legata strettamente alla superficie di Fermi. Le traiettorie degli elettroni risultano sempre perpendicolari al campo magnetico. Quando la superficie isoenergetica è chiusa (*a sinistra*), le traiettorie rimangono pure chiuse indipendentemente da come si faccia ruotare la direzione del campo magnetico. Se invece la superficie è aperta (*a destra*), per certe orientazioni del campo magnetico gli elettroni possono sfuggire verso l'infinito.

Quando la superficie di Fermi è un mostro, ovvero complicata, le traiettorie degli elettroni possono assumere parecchie forme. Aumentando l'energia i tubi che formano la superficie diventano piú grossi. In conseguenza di ciò le aree delimitate da certe traiettorie aumentano (*a*) mentre le aree delimitate da altre traiettorie diminuiscono (*b*). Un elettrone sulla curva *a* si muove rispetto al campo magnetico nella stessa direzione di un elettrone libero. Sulla curva *b* si muove nella direzione opposta.

Il percorso di un elettrone in un campo elettrico costante (*a sinistra*) oscilla tra lo zero e un certo valore massimo, E_{max}, che risulta essere funzione della quantità di moto della particella e della forza che agisce su di essa. I limiti massimo e minimo dell'oscillazione dell'elettrone possono anche essere rappresentati graficamente sotto forma di una banda spaziale (*a destra*).

L'elettrone che si muove in un intenso campo magnetico parallelo alla superficie di un metallo segue un percorso elicoidale. Durante il periodo del cammino libero esso passa ripetute volte attraverso lo strato superficiale; questo attraversamento avviene però soltanto a condizione che lo spessore dello strato, *d*, sia molto inferiore al raggio dell'orbita dell'elettrone.

La risonanza ciclotronica di un elettrone può essere osservata in una lastra metallica quando il diametro dell'orbita è inferiore allo spessore della lastra. Se il diametro supera lo spessore della lastra, l'elettrone viene riflesso dalla superficie interna e perciò sembra avanzare con una serie di salti. In questa figura il campo magnetico è perpendicolare al piano della pagina.

risultati sperimentali con la teoria completa dei fenomeni galvanomagnetici, sviluppata dagli autori di questo articolo insieme a V. G. Peschanskji, ha fornito informazioni dettagliate riguardanti la legge di dispersione degli elettroni di conduzione.

Un metodo particolarmente efficace di studiare le superfici di Fermi è costituito dalla risonanza ciclotronica, che è stata prevista fin dal 1956 da uno degli autori (Azbel') insieme a E. A. Kaner. Si ponga un metallo in un campo magnetico costante e intenso, parallelo alla superficie del campione. Se le traiettorie delle cariche sono chiuse, esse si muoveranno allora su curve chiuse giacenti in un piano perpendicolare alla superficie del metallo, compiendo un notevole numero di rivoluzioni durante il periodo del cammino libero (*si veda la figura al centro nella pagina a fronte*). Si diriga un flusso di onde radio all'interno del metallo. Come risultato della interazione delle onde radio con gli elettroni di conduzione, le onde radio si attenuano rapidamente e penetrano per un piccolo tratto all'interno del metallo (corrispondente alla profondità dello strato superficiale). In un metallo molto puro alla temperatura dell'elio liquido lo strato superficiale corrispondente a onde radio di lunghezza centimetrica ha una profondità compresa tra 10^{-5} e 10^{-6} centimetri, mentre l'orbita dell'elettrone in un campo magnetico di 10 000 oersted è molto piú grande (circa 10^{-3} centimetri). Se il periodo di rivoluzione della carica è un multiplo del periodo del campo ad alta frequenza generato dalle onde radio, la carica, penetrando lo strato superficiale, verrà accelerata a ogni rivoluzione: la corrente aumenterà rapidamente di intensità e, in definitiva, si instaurerà un regime di risonanza. Il punto cruciale è costituito dal fatto che i periodi di rivoluzione di cariche diverse differiscono fra loro e dipendono dalla posizione della sezione piana della superficie isoenergetica. Perciò non tutti gli elettroni prendono parte al fenomeno della risonanza ma soltanto alcuni elettroni « selezionati » che si trovano all'interno di quelle sezioni per le quali il periodo di rivoluzione cambia molto lentamente col mutare della sezione stessa, in modo che il maggior numero possibile di cariche si trovi in condizioni prossime a quelle di risonanza.

La risonanza ciclotronica è divenuta uno dei metodi piú largamente usati per studiare la struttura elettronica dei metalli. Si può osservare la risonanza nella lastra metallica solo finché l'orbita corrispondente alle cariche « selezionate » che prendono parte alla risonanza riesce a inserirsi completamente nella lastra (*si veda la figura in basso nella pagina a fronte*). Non appena si trasgredisce a questa condizione le cariche vengono diffuse dall'altra faccia della lastra, cioè vengono per cosí dire spinte fuori strada e la risonanza sparisce. Ciò significa che si può misurare il raggio dell'orbita semplicemente determinando l'istante in cui sparisce la risonanza. In tal modo risulta possibile determinare la geometria della superficie di Fermi.

Gli elettroni che ruotano in un campo magnetico parallelo alla superficie di un metallo portano all'interno del campione un campo elettrico alternato. Il fenomeno è dovuto al fatto che gli elettroni, quando abbandonano lo strato superficiale, portano con sé una corrente elettrica mentre viaggiano all'interno del metallo. Le cariche si radunano all'estremità piú bassa dell'orbita e producono ivi un massimo nella densità di corrente, evidenziato dai picchi che si elevano nel punto d'incontro delle prime due orbite. Il fenomeno si ripete con minore intensità presso il successivo punto d'incontro delle orbite. Il campo magnetico è perpendicolare al piano della figura.

La risonanza ciclotronica è accompagnata da un fenomeno particolarmente interessante. Le cariche che abbandonano lo strato superficiale portano con sé una corrente elettrica verso l'interno del metallo, si riuniscono tutte insieme nella parte piú bassa dell'orbita e producono ivi un massimo nella densità della corrente. La corrente alternata produce un campo elettrico che accelera il gruppo di cariche successivo; queste cariche a loro volta trasportano la « loro » corrente verso l'interno del metallo, e il ciclo si ripete. In conseguenza di ciò compaiono nel metallo picchi di campo elettrico e di corrente a distanze prefissate (*si veda la figura in questa pagina*).

La fecondità del concetto di quasiparticella applicato ai metalli è confermata dal fatto che nei 10 anni circa da quando tali concetti sono stati sviluppati è stato possibile prevedere e spiegare un notevole numero di fenomeni fisici, nonché studiare a fondo la legge di dispersione per un grande numero di metalli, e in particolare stabilire con certezza quali superfici di Fermi si verifichino e in quali metalli. Questi studi hanno conseguito il risultato di una piú profonda comprensione della natura dello stato metallico e di una chiarificazione della causa delle differenze di comportamento esistenti fra i metalli. L'analisi dello spettro di energie degli elettroni ha rivelato proprietà dei metalli dapprima neanche sospettate.

La fisica dello stato solido si affaccia ora al problema di costruire una valida teoria delle sostanze amorfe e non cristalline, delle leghe piú disordinate e delle sostanze costituite da lunghe catene di molecole di polimeri. Tali strutture comprendono sistemi dotati di un elevato grado di ordine di tipo non cristallino. Questi sistemi, che mostrano un tipo di ordinamento particolarmente complicato (in opposizione al tipo di ordinamento « primitivo » presentato dagli ioni nei cristalli), sono i sistemi biologici. Non c'è bisogno di mettere in luce la loro importanza, o l'interesse che suscitano. Lo studio di questi sistemi è appena iniziato, ma si può sperare che le idee che sono state cosí feconde nell'ambito della teoria quantistica dello stato cristallino si riveleranno utili anche nel nuovo campo, almeno per certi aspetti.

I filati

L'antichissima tecnologia della filatura si sta evolvendo con la comparsa di nuove fibre: alcune di queste sono simili al cotone, alla lana o alla seta mentre altre hanno proprietà del tutto nuove

di Stanley Backer

Per filato s'intende nell'uso comune quel materiale impiegato per eseguire lavori a maglia mentre nell'industria tessile il filato è un assieme di fibre o di filamenti naturali o artificiali ritorti assieme a formare un filo continuo con cui si può produrre maglieria, stoffa, passamaneria o altri tipi di tessuto. Come si può facilmente immaginare, dato il tempo assai remoto a cui risalgono i primi tessuti, alcune tecnologie di filatura sono antichissime, mentre altre sono del tutto nuove. Quello che invece sorprende è la scarsissima conoscenza della tecnologia dei filati al di fuori dell'industria tessile, tenuto conto che tutti usano maglieria e stoffe.

Il lavoro che si deve compiere per mettere insieme un filato partendo dalle sottilissime fibre di cotone (ciascuna non piú lunga di due o tre centimetri) dà un'idea dei processi fondamentali della filatura. Il cotone proveniente dalla balla viene lavorato da macchine che aprono, puliscono e separano parzialmente le fibre e che producono una sorta di tappeto piuttosto spesso e compatto chiamato falda. La falda passa attraverso una cardatrice in cui viene stirata da un cilindro, munito di sottili uncini o di spazzole metalliche che ruota contro una cinghia in movimento divisa in segmenti e dotata di uncini o spazzole analoghe. Con questa operazione le fibre vengono prima aperte e separate ulteriormente e poi parallelizzate: si ottiene cosí un sottile velo di fibre che viene fatto passare attraverso un dispositivo a forma di imbuto con cui si produce una specie di grosso filo chiamato nastro di carda (se si vuole ottenere un filato sottile, le fibre vengono ulteriormente parallelizzate con un processo di pettinatura da cui si ottiene un nastro pettinato). Parecchi di questi nastri sono poi disposti vicini e paralleli e stirati mediante una serie di cilindri; si ricavano cosí nastri piú sottili, che sono sottoposti a un'ulteriore stiratura e a una lieve torsione per formare uno stoppino di forma cilindrica che ha un diametro di circa 2,5 millimetri. Lo stoppino, avvolto su bobine, passa nei banchi di filatura che lo assottigliano mediante stiro e gli impongono la torsione necessaria per ottenere il filato. La torcitura conferisce a un filato a fibra corta la necessaria resistenza facendo in modo che una qualsiasi sollecitazione di trazione venga scomposta in una pressione laterale che impedisce alle fibre di scorrere una rispetto all'altra.

Le fibre tessili

Si ritiene che il primo tentativo dell'uomo di realizzare funi e cordami consistette nell'attorcigliare o nell'avvolgere insieme tralci di vite o di altre piante a fibra lunga. Molte fibre di questo tipo costituiscono ancora la materia prima per la fabbricazione di tessuti: la juta nei supporti di tappeti e nei sacchi agricoli, il lino nella biancheria, la canapa nello spago e nei cordami, la manilla e il sisal (che sono fibre ricavate da foglie) nei cordami. Anche l'amianto, una fibra naturale minerale, è stato largamente impiegato nell'isolamento di tubi, nei pannelli di rivestimento e nella confezione di indumenti resistenti al calore.

Tuttavia i filati pregiati sono stati ricavati per molti secoli da fibre sottili, fra cui spiccano il cotone (costituito dai peli del seme) e la lana. Negli USA fino a tempi assai recenti il cotone ha dominato incontrastato: prima del 1967 il consumo di cotone era superiore al consumo globale di tutte le altre fibre; adesso ha però perso il primato che è passato alle fibre sintetiche.

Per molto tempo la lana è stata al secondo posto fra le materie prime impiegate dall'industria tessile statunitense, ma è anch'essa in declino: negli ultimi dieci anni ha costituito solo il 5 per cento circa del consumo nazionale di fibre. Da un punto di vista tecnico la lana è però una fibra molto interessante perché dotata di proprietà uniche che si cerca spesso di imitare nelle fibre sintetiche: presenta un elevato allungamento (dal 25 al 30 per cento sul condizionato contro l'8-10 per cento del cotone), una forte elasticità e un coefficiente di attrito che varia secondo la direzione di sfregamento, caratteristica quest'ultima che contribuisce in modo notevole alla capacità delle fibre di lana di spostarsi all'interno del filo favorendo il loro aggrovigliamento locale chiamato infeltrimento. La lana ha anche un comportamento bilaterale di rigonfiamento e di ritiro derivante dalle differenze strutturali nelle cellule della corteccia; di conseguenza la fibra di lana si piega, come un termostato bimetallico, seguendo le variazioni delle condizioni ambientali. La piegatura spontanea di una lunga striscia vincolata alle estremità, dà luogo a una configurazione arricciata a spirale. Le fibre cui è stata imposta un'ondulazione elicoidale danno luogo a filati con struttura aperta e di bassa densità e con piacevole morbidezza, elasticità e volume.

L'elevato costo della lana costituí uno dei primi incentivi nella ricerca di fibre chimiche, cosicché la lana, negli ultimi 20 anni, è stata progressivamen-

Il complicato merletto, ingrandito circa 20 volte, rappresentato nella fotografia della pagina a fronte è realizzato con tre tipi di filato. Uno è un monofilo in nylon verde che forma le sezioni aperte del disegno; il secondo è un filato in nylon verde composto con numerosi filamenti che sono stati testurizzati o arricciati, per aumentarne il volume e l'opacità; il terzo è un filato ritorto di colore giallo di rayon viscosa. Il tessuto, prodotto utilizzando una macchina Raschel per maglieria, è della Takeda Lace Company.

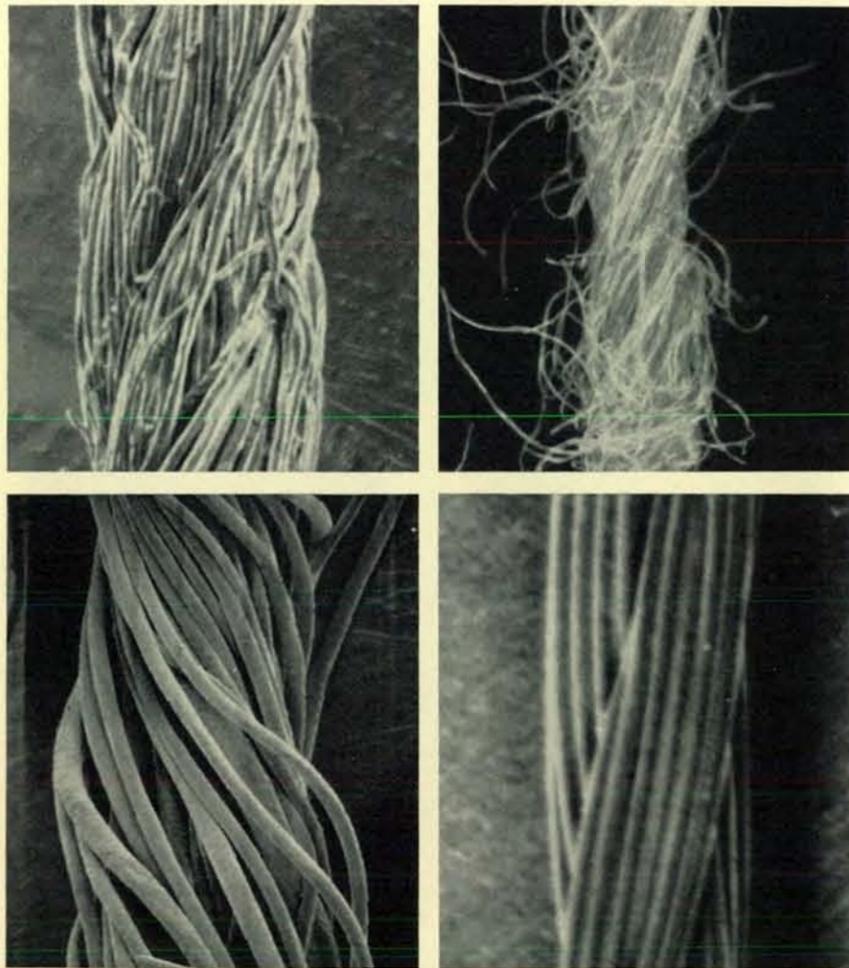
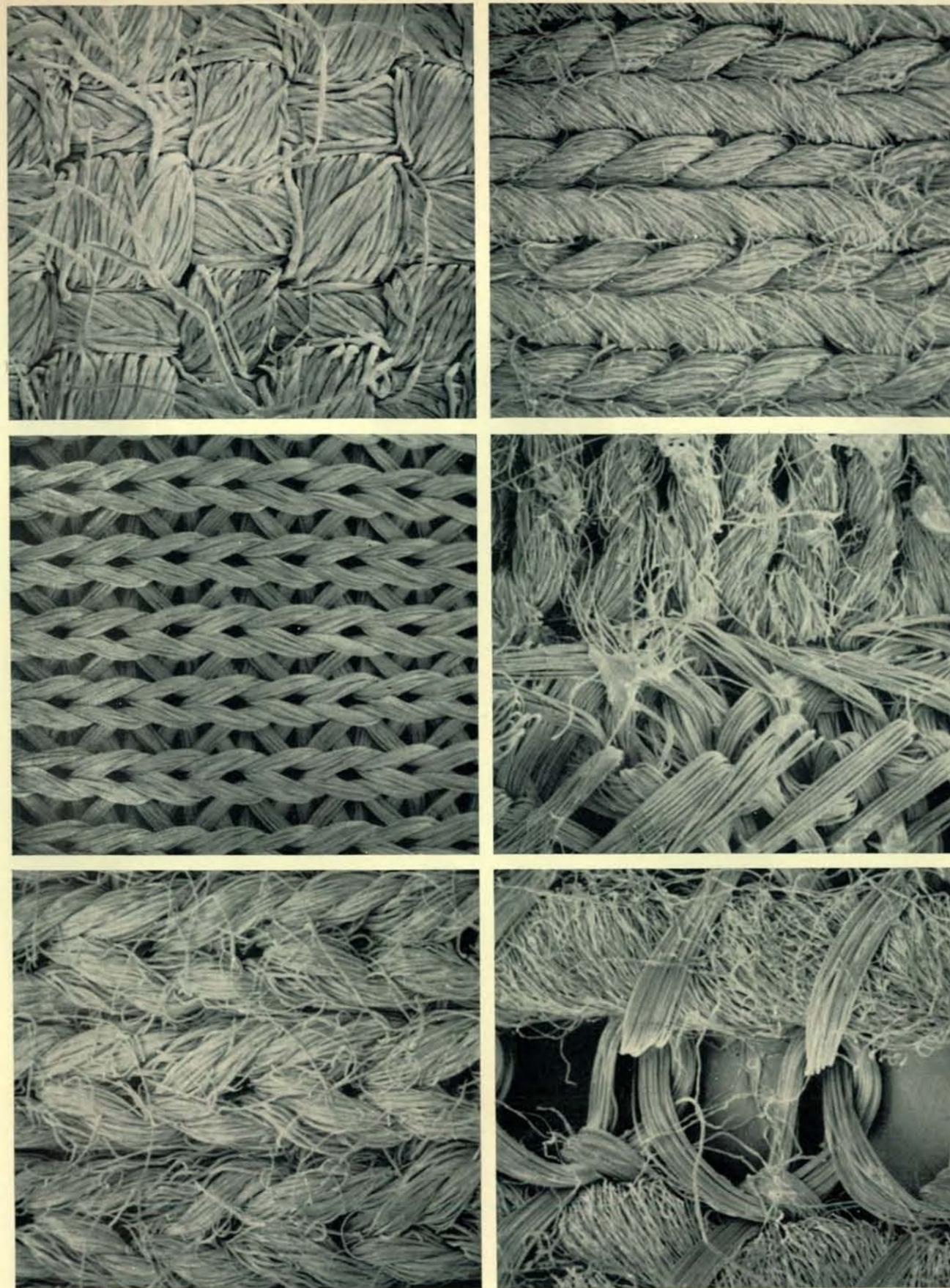
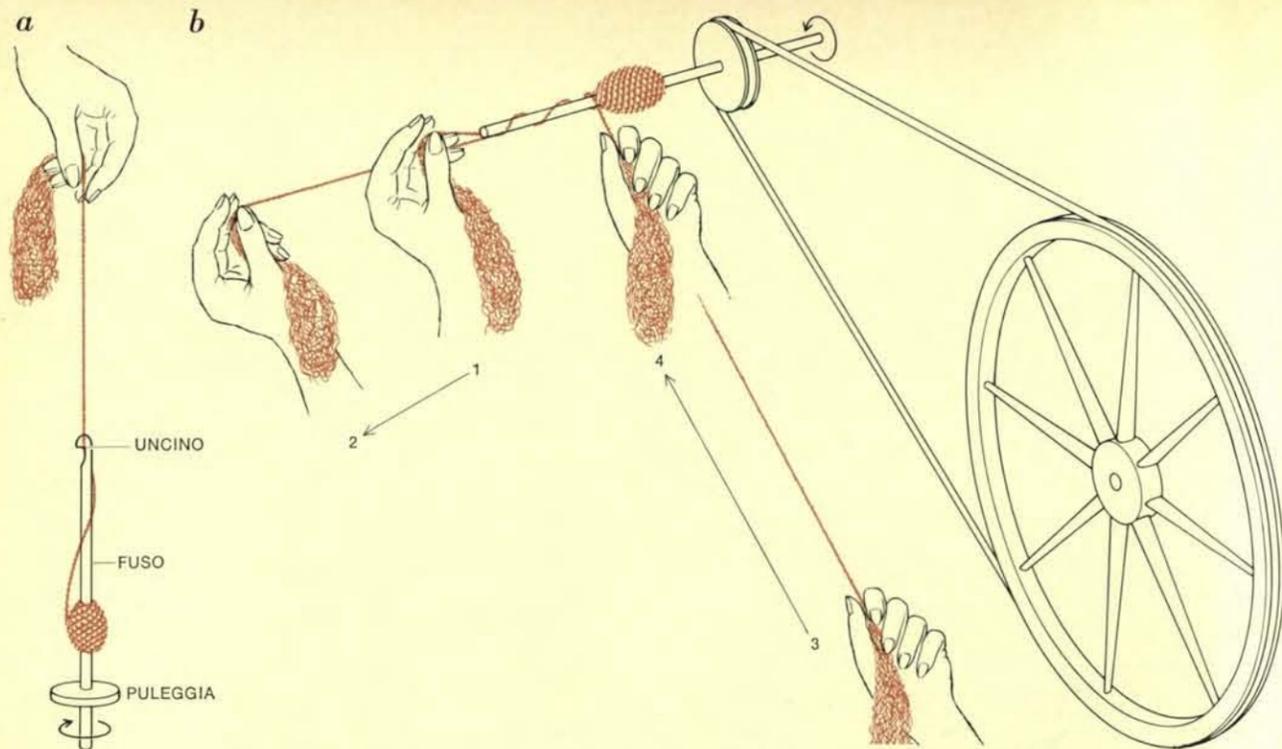
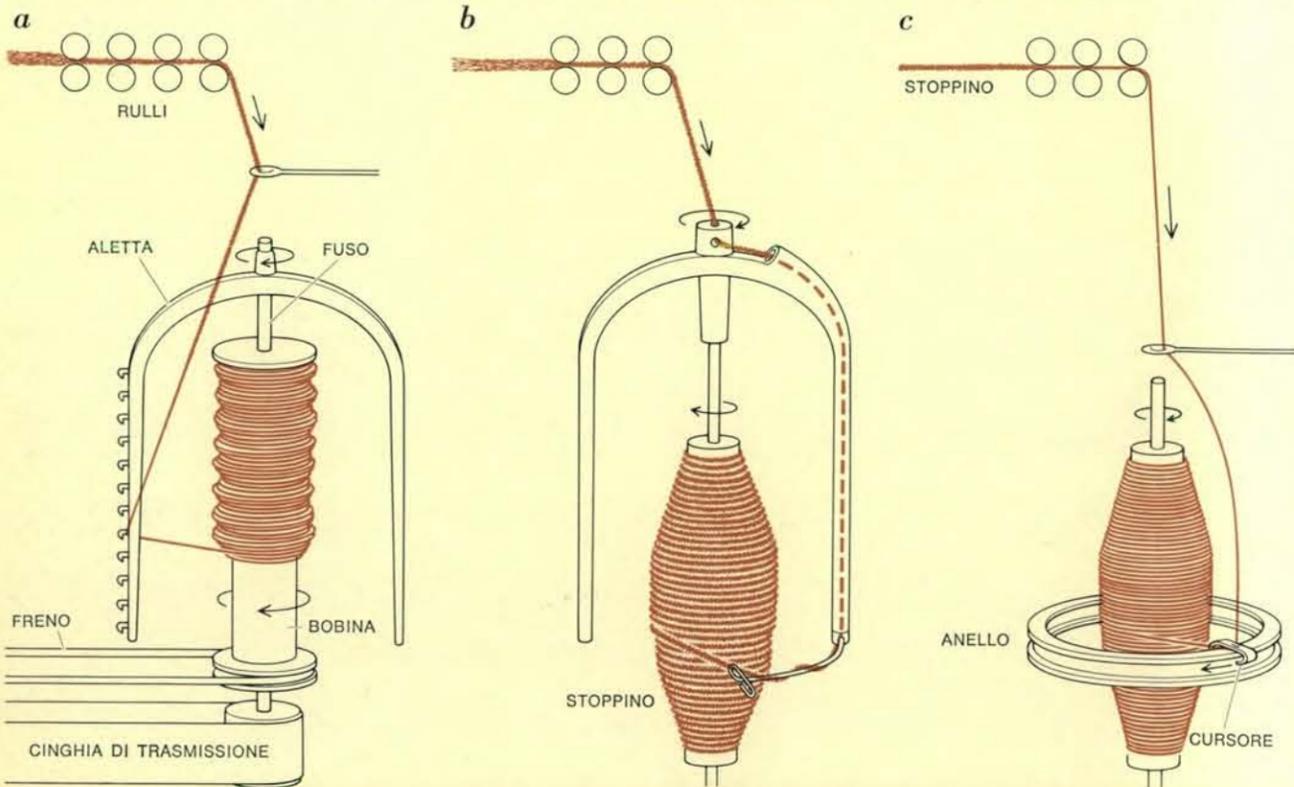
te sostituita dalle fibre sintetiche, dapprima nei tessuti misti e adesso in quelli realizzati esclusivamente con fibre sintetiche. I filati sintetici usati nell'abbigliamento al posto della lana non vengono tuttavia prodotti partendo da quei filamenti continui in cui sono state inizialmente estruse le fibre realizzate dall'uomo, bensí da fibre corte tagliate in fiocco che vengono poi filate con i metodi usati per il cotone e la lana. Lo sviluppo di filamenti in forma continua ha seguito una strada completamente separata: la strada delle fibre e dei tessuti simili alla seta.

La seta è prodotta dal baco da seta, larva del lepidottero *Bombix mori*, che con essa costruisce il bozzolo. Essa è un filamento doppio di sezione triangolare, prodotta dal baco in spezzoni di enorme lunghezza; filatori e tessitori conoscono a fondo e da secoli le sue proprietà. L'influsso diretto della seta sul mercato tessile è oggi trascurabile; la sua importanza è invece grandissima per lo sviluppo dei moderni prodotti tessili. I filatori che lavoravano la seta impararono come trasformare in filati i filamenti continui senza romperli o tagliarli. Molte delle prime fibre chimiche furono ottenute sotto forma di filamenti continui e servirono per fabbricare tessuti derivati dall'esperienza industriale sulla seta: la normale fodera in acetato delle giacche da uomo è un esempio tipico di tale provenienza.

Le prime fibre chimiche erano essenzialmente costituite da molecole di cellulosa rigenerata, derivate da fibre di legno o da linters di cotone (fibre molto corte) e dopo l'estrusione si presentavano diritte e senza torsione. Benché l'aspetto lucido e levigato e la superficie fresca e liscia delle stoffe tessute con questi filamenti fossero ideali per gli abiti da sera e le fodere delle giacche, non erano in molti casi adatte per capi di vestiario esterni da indossare ogni giorno. Il consumatore preferiva l'aspetto non lucido, peloso e piú ruvido delle stoffe tessute con fibre naturali corte e arricciate. Di conseguenza l'industria provvide a tagliare molti dei filamenti continui che produceva, impartí loro un arricciamento e li immise in quegli impianti che avevano in precedenza prodotto filati con fibre naturali derivate dal fiocco. I prodotti cosí ottenuti assomigliavano molto ai tessuti fabbricati con il cotone e la lana (il raion viscosa in filo continuo è ancora usato nelle tele dei pneumatici e il raion acetato nella biancheria intima femminile e nelle fodere).

Le fibre di vetro fecero la loro comparsa commerciale nel 1934, ma ebbero all'inizio una scarsa influenza sul mercato dell'abbigliamento; ben presto, per l'elevata resistenza alla rottura, la stabilità dimensionale e la resistenza all'attacco chimico, fotochimico e microbiologico, trovarono vaste applicazioni nella produzione di materie plastiche rinforzate, filtri e isolanti termici ed elettrici. Piú di recente hanno conquistato una buona porzione del mercato dei tendaggi e sono state applicate nella fabbricazione di pneumatici cinturati a tele diagonali. Ultimamente lo sviluppo di sottilissimi filati in vetro, con diametro inferiore a un decimo di quello delle altre fibre tessili commerciali, ha introdotto tali fibre in altri prodotti quali per esempio le coperte da letto e le fodere per assi da stiro.

La comparsa del nylon nel 1939, prima fibra completamente sintetica, aprí una nuova era nella tecnologia tessile. Il nylon viene attualmente prodotto pressappoco in 10 differenti tipi fondamentali: il consumo mondiale di queste fibre poliammidiche supera 1,8 milioni di tonnellate (in prevalenza nylon dei tipi 6 e 6,6). Le fibre poliesteri, sviluppate nel 1941, coprono ora circa un quarto della produzione mondiale di fibre sintetiche. Con il nylon, formato soprattutto in filo continuo, si ottiene un filato liscio e lucente di caratteristiche adatte per confezionare biancheria intima e maglieria femminile, cordonetto per pneumatici e tessuti industriali. Le fibre poliesteri sono state filate partendo sia dal fiocco sia dal filo continuo: il primo è stato usato misto a lana per abiti e misto a cotone per camicie; il secondo per vestiti, biancheria femminile, cordonetti per pneumatici, tessuti per vele e molto di recente stoffe per vestiti a doppia maglia.

Le fibre acriliche, che rappresentano un altro importante gruppo, furono realizzate per la prima volta circa 25

Quattro classiche strutture di filati: cotone (*in alto a sinistra*), lana (*in alto a destra*), lana pettinata (*in basso a sinistra*) e filamento continuo in poliestere (*in basso a destra*). I primi tre sono filati derivati dal fiocco e costituiti da fibre piuttosto corte ritorte insieme per formare il filo, mentre il filato derivato da filo continuo è un fascio di fibre praticamente senza fine. Gli ingrandimenti fotografici delle quattro immagini sono diversi fra loro; le singole fibre naturali o sintetiche hanno diametri compresi fra 25 e 50 micron.

Alcune strutture di tessuti comuni: tessuto liscio di cotone ad armatura semplice (*in alto a sinistra*); jersey di cotone (*in alto a destra*); maglia di nylon (*al centro a sinistra*); tessuto a maglia accoppiato a maglia regolare (*al centro a destra*); maglia a doppio filo (*in basso a sinistra*); tessuto cucito (*in basso a destra*). La prima struttura è ingrandita 75 volte, le altre circa 25.

Per molto tempo la filatura è stata eseguita a mano. Nel processo a fuso sospeso (*a*) il fuso è fatto ruotare con una mano, la puleggia funge da volano, mentre l'altra mano tiene la massa delle fibre. Di tanto in tanto il filo prodotto viene sfilato dall'uncino e avvolto sul gomitolo. Con la ruota a filare (*b*) il fuso è orizzontale e azionato dalla ruota: la massa delle fibre è tenuta vicina alla estremità del fuso (*1*) che con la rotazione attorciglia le fibre producendo il filo; la mano viene progressivamente allontanata dal fuso fino a ottenere una lunghezza di filo corrispondente al braccio (*2*). Il filo viene quindi portato in posizione perpendicolare al fuso (*3*) e avvolto sul gomitolo con la rotazione del fuso (*4*). Il processo viene quindi ripetuto da capo.

I metodi di filatura dell'era moderna eseguono nello stesso tempo le operazioni di stiratura e di torcitura. La macchina ad acqua di Richard Arkwright aveva una serie di rulli per la stiratura e un'aletta a forma di *U* per la torcitura (*a*); l'aletta era fatta girare e la bobina tendeva a seguirne la rotazione essendo frenata per impartire una maggior torsione al filato. I vari ganci sull'aletta servivano a ottenere un avvolgimento sufficientemente regolare. In un moderno banco per stoppino (*b*), i rulli che girano a velocità crescenti, stirano il nastro di fibre per ottenere un cordoncino piú sottile e tenace. Il fuso ad aletta e la bobina vengono mossi indipendentemente. Lo stoppino cosí prodotto viene ulteriormente stirato e ritorto in un filatoio (*c*). Qui la bobina viene fatta ruotare e il cursore è trascinato lungo una rotaia rigida circolare che si alza e si abbassa.

anni fa. Grazie all'aspetto caldo ed elegante, la maggior parte di esse viene filata dal fiocco per tessuti da arredamento e moquettes. Fra le fibre sintetiche apparse in questi ultimi anni sono da citare il « saran » (cloruro di vinilidene) per la resistenza all'abrasione e agli agenti atmosferici, lo « spandex » (di origine poliuretanica) per le proprietà simili alla gomma, il « vinal » (derivato dall'alcool vinilico), le poliolefine (come polietilene o polipropilene), il « vinyon » (derivato dal cloruro di vinile) e il triacetato, conosciuto per l'aspetto piacevole, la facilità di manutenzione e la possibilità di essere termofissato.

La filatura

Le tecnologie per la produzione dei filati sono di solito strettamente connesse con le proprietà delle fibre che costituiscono i filati stessi. Solo pochissime fibre avevano un rilievo economico prima della comparsa di quelle sintetiche e quindi le prime filatrici dovevano cimentarsi con uno scarso numero di differenze nelle proprietà delle fibre: è probabile che le filatrici dell'antichità (di cui vi sono tracce risalenti a 15 000 anni fa in Asia e a 12 000 nel Nord Africa) avessero una scarsa conoscenza delle loro proprietà oltre a quelle che percepivano con la vista e il tatto. Ognuna di quelle filatrici era però capace di scegliere le fibre che potevano essere estratte sotto forma di rotolo da un ammasso fibroso informe, quindi stirate o allungate facendole scorrere longitudinalmente una rispetto all'altra e infine avvolte in un assieme cilindrico: il filo. Tale processo di filatura a mano può essere eseguito da chiunque dopo un certo allenamento: la materia prima di partenza viene tenuta in una mano mentre con l'altra si estrae un piccolo rotolo e lo si riduce alle dimensioni del filo di cui viene fatta contemporaneamente ruotare l'estremità libera, attorcigliando cosí le fibre assottigliate e ottenendo un cordoncino.

Per facilitare la rotazione dell'estremità libera fu naturale attaccarvi un piccolo fuso, a sua volta fissato a una puleggia o peso. L'insieme fuso-puleggia veniva fatto ruotare rapidamente a mano: esso si comportava come un volano e continuava a ruotare per un certo tempo imprimendo simultaneamente la torsione al filo. Le antiche filatrici inventarono anche la rocca, in cui si disponevano le fibre da filare.

La ruota a filare venne forse inventata in India 1000 anni fa. La ruota, fatta girare a mano, muoveva una cinghia o una fune montata lungo il suo perimetro che azionava un insieme fuso-puleggia applicato su un'armatura con un semplice supporto. A ogni giro della ruota corrispondevano molti giri della puleggia. Dopo aver avvolto sul fuso una lunghezza di filo corrispondente al braccio, la filatrice spostava la mano, modificando l'angolo fra il filo e il fuso, per avvolgere il filo appena filato su una bobina (*si veda l'illustrazione nella pagina a fronte in alto*). Questo semplice processo in due fasi (stiratura e torsione, seguite da avvolgimento) fece fronte ai bisogni tessili dell'umanità per molti secoli.

Il filatoio ad acqua di Arkwright, la prima macchina continua per filare, eseguiva le operazioni di stiratura e di torcitura con un unico dispositivo azionato ad acqua. Dai rulli gli stoppini scendono verso una serie di alette azionate da un'unica cinghia.

La produttività della tessitura venne molto accresciuta con l'invenzione della navetta nel 1733, e ciò richiese di conseguenza una piú elevata produttività nella filatura. Alcune delle invenzioni di quel tempo simulavano ancora il funzionamento intermittente del filatoio manuale a ruota. James Hargreaves, nel 1762, equipaggiò inizialmente il suo filatoio multiplo, che chiamò « spinning jenny » dal nome della figlia, con otto fusi montati su un'incastellatura, ciascuno azionato da una fune avvolta su un rullo comune mosso a sua volta da una grande ruota fatta girare dalla filatrice. La fibra, sotto forma di otto stoppini, veniva fatta passare attraverso una staffa montata sopra un carrello: questo era spinto avanti e indietro a mano, una volta durante l'operazione di stiratura e torcitura e l'altra durante l'avvolgimento. Gli ultimi modelli di questa macchina avevano fino a 100 fusi.

Il processo a lavoro intermittente in due fasi della filatura manuale fu adottato nel filatoio meccanico di Samuel Crompton del 1779, che combinava in una macchina ibrida detta « mule jenny » il filatoio di Hargreaves e la stiratura a cilindri inventata da John Wyatt e Lewis Paul nel 1738. I principi fondamentali della macchina possono essere oggi visti nei filatoi intermittenti a motore che ancora producono in alcune parti del mondo filati di alta qualità.

I processi continui

Il problema di ritorcere e avvolgere contemporaneamente in un processo continuo venne risolto con l'invenzione dell'aletta a *U* rovesciata montata coassialmente con la bobina principale, ma rotante con una diversa velocità angolare. Il filo appena stirato veniva fatto passare per il vertice dell'aletta, poi lungo uno dei suoi bracci e infine avvolto sulla bobina. La differente ve-

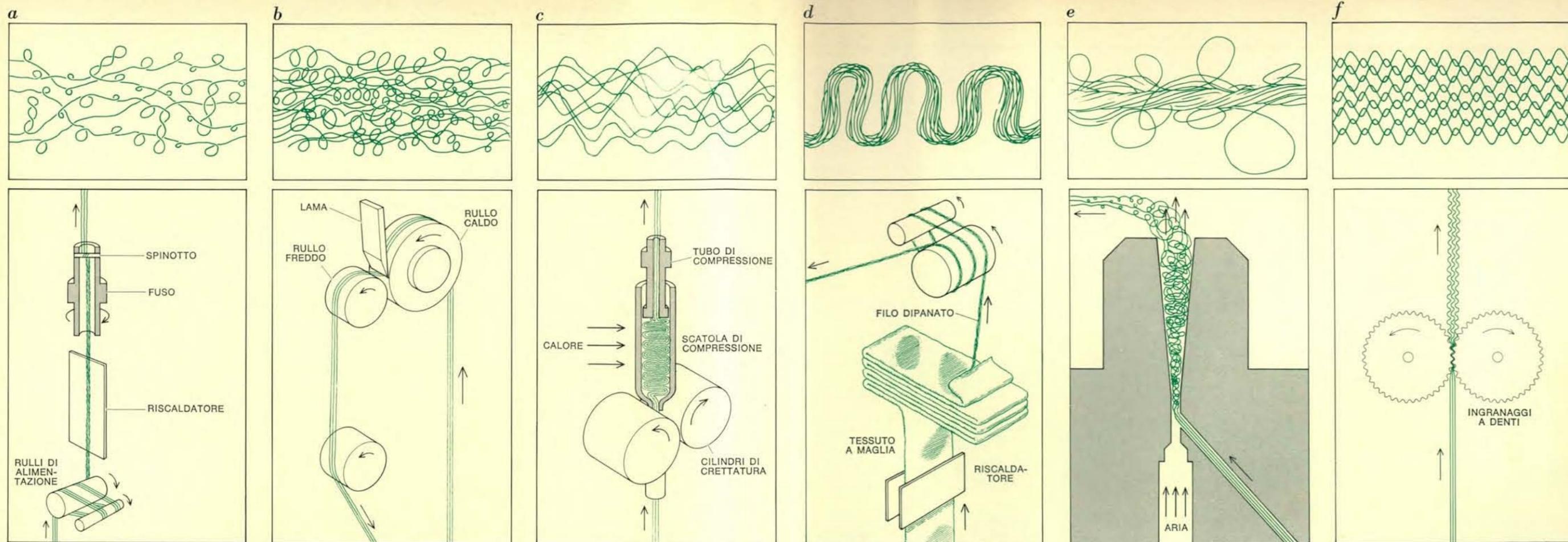
a

b

c

d

e

f

Sono qui schematizzati i processi di testurizzazione insieme con i relativi prodotti. La torcitura temporanea (*a*) viene impartita da un fuso rotante che ritorce il filato fino ai rulli di alimentazione; la torsione viene resa « permanente » con calore, anche se il filo non viene ritorto mentre passa attraverso il fuso. L'« edge crimping » (crettatura in superficie) (*b*) viene eseguito premendo una lama affilata contro il filo riscaldato. Questi primi due metodi possono produrre filati « stretch », cioè elasticizzati. Nella scatola di compressione (*c*) viene impartita al filo una leggera ondulazione mediante la compressione dovuta al peso stesso della massa di filato presente nella scatola. Il processo di tessitura e dipanatura (*d*) richiede la preventiva formazione di un tessuto tubolare su una macchina per maglieria; la geometria dei cappi viene fissata con calore e quindi il filo viene dipanato. Nella testurizzazione mediante getto d'aria (*e*) il filo viene fatto passare insieme all'aria nella sezione minima di un ugello. A valle dell'ugello l'aria si espande e la corrente diviene turbolenta mentre i filamenti formano cappi che si aggrovigliano fra loro. La crettatura con ingranaggi a ruote dentate (*f*) deforma semplicemente le fibre che passano fra i denti di due ingranaggi.

locità angolare fra l'aletta e la bobina e il diametro della bobina stabilivano la velocità con cui il filo veniva avvolto, mentre il numero di giri compiuto dall'aletta per unità di lunghezza del filo determinava la torsione. Le due operazioni erano simultanee.

L'esigenza di un processo di stiratura a velocità costante che consentisse l'alimentazione continua della successiva fase di filatura fu soddisfatta con un semplice dispositivo costituito da due serie di cilindri rotanti a velocità differente fra i quali veniva stirato il nastro. Richard Arkwright riunì per primo la stiratura a cilindri con la filatura mediante bobine e alette nella sua macchina ad acqua del 1769, nella quale l'acqua costituiva la sorgente di energia. Si trattò del primo processo continuo, i cui principi si ritrovano in tutti i più importanti sistemi moderni di filatura: nella filatura ad alette; in quella a campana, nella quale la bobina viene mossa e il filo è fatto prima passare all'interno di una guida per imprimergli la voluta torsione e quindi scorrere sul bordo della campana per ottenere una differenza di velocità angolare che consenta l'avvolgimento; infine nella filatura ad anello in cui lo stoppino viene stirato attraverso dei cilindri, mentre la bobina che ruota in senso orario, tira il filo attraverso una guida trascinando nel contempo un anellino in acciaio o un gancio in plastica (il cursore) lungo una piastra circolare ad anello (ring) con una piccola velocità angolare relativa, sufficiente per l'avvolgimento (*si veda l'illustrazione a pagina 48 in basso*). La filatura ad anello è oggi il processo più diffuso: con i perfezionamenti introdotti si sono raggiunte velocità del fuso di 20 000 giri al minuto e del cursore superiori a tre chilometri al minuto.

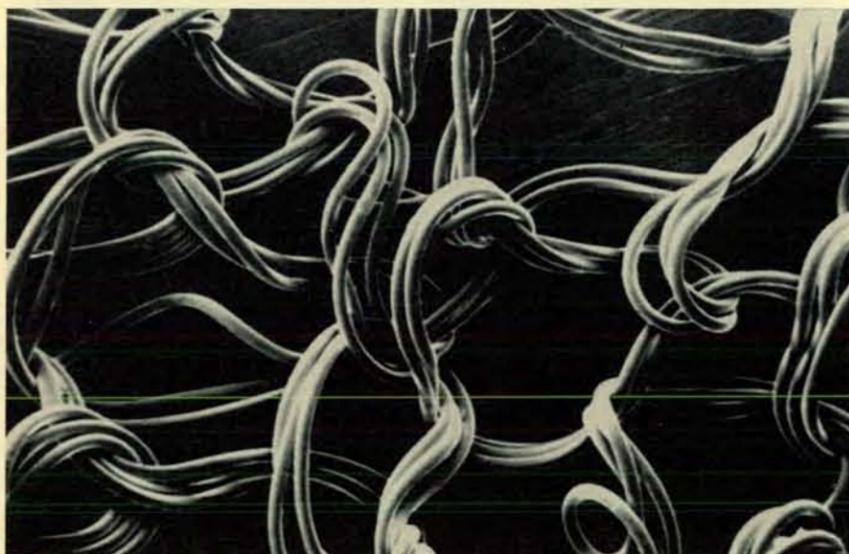
La manifattura tessile è tuttora dominata da quattro sistemi fondamentali di preparazione del filo e di filatura, tutti precedenti alla comparsa delle fibre sintetiche: sistema cotoniero cardato, sistema cotoniero pettinato, sistema laniero cardato e sistema laniero pettinato. I primi due sono stati elaborati per la lavorazione di fibre di cotone lunghe fra 2,5 e 4 centimetri e gli altri due per fibre di lana lunghe rispettivamente fra 5 e 7,5 centimetri e fra 7,5 e 13 centimetri. Il sistema laniero pettinato comprende ovviamente anche una fase di pettinatura. I filati che vengono preparati con questi sistemi sono ancora chiamati con le vecchie denominazioni, anche se la fibra di partenza è acrilica o poliestere: si trova per esempio la dizione « filato in lana pettinata » in abiti costituiti dal 100 per cento di poliestere.

Un sistema di preparare le fibre sintetiche continue per ottenerne filati assomiglianti a quelli in cotone o in lana è il taglio di un gran numero di filamenti riuniti parallelamente insieme, noto come « tow » (nastro). Il fascio di filamenti tagliati può essere poi lavorato in un modo molto simile ai nastri di fibre ottenute dal fiocco. Negli ultimi 20 anni sono stati sviluppati due importanti metodi per la conversione del tow: nel primo, un coltello rotante a spirale viene premuto contro uno strato di filamenti disposti con regolarità, producendo un fiocco di fibre di lunghezza abbastanza uniforme; nel secondo, eseguito con strappatrici, i filamenti vengono stirati e rotti tirando il tow fra due serie di pesanti cilindri. I filamenti si strappano però indipendentemente l'uno dall'altro e le fibre che si ricavano hanno lunghezze casuali.

Il nastro ottenuto dalla conversione del tow con uno di questi metodi viene di solito arricciato comprimendolo longitudinalmente sotto pressione in un tubo scanalato e termofissandolo a secco o a umido. Man mano che le fibre vengono forzate nel tubo, si arricciano e si ondulano acquistando, prima di essere estratte, una deformazione permanente. Le fibre arricciate sono adatte a essere lavorate con i vari tipi di macchine per la stiratura e la filatura. Con il metodo di conversione del tow si può così produrre un filo derivato dal fiocco senza ricorrere alle macchine per l'apertura, la sfilacciatura e la cardatura, che sono le operazioni che determinano la maggior parte di scarti nei cotonifici e nei lanifici.

La conversione del tow presenta naturalmente alcuni svantaggi, primo fra tutti il fatto che la dimensione del cavo di partenza (da alcune migliaia ad alcune centinaia di migliaia di fibre) costringe a stirare il nastro risultante diverse volte prima di poter ritorcere il filo. La realizzazione di un filato ottenuto direttamente da filo continuo che presentasse la morbidezza, le dimensioni, la lucentezza ridotta, perfino la pelosità del filo derivato dal fiocco ha costituito per l'industria un grosso problema; la soluzione è stata l'introduzione di filati « testurizzati », ovvero di filo continuo trattato in modo tale da ottenere in un tessuto il tipo di struttura caratteristica dei tessuti in lana o in cotone (*si veda l'illustrazione qui sopra*).

I processi di testurizzazione

Un metodo di testurizzazione richiede di imporre una torsione temporanea al filo. I fabbricanti svizzeri di filo escogitarono circa 40 anni fa un processo in tre fasi per raggiungere tale scopo; nella prima fase viene impartita al filo una forte torsione che nella seconda fase viene resa permanente con calore o con un agente chimico; nella terza fase il filato viene avvolto su bobine per essere impiegato nella fabbricazione di tessuti con intreccio a maglia o con intreccio a tessuto. Dopo la tintura e la rifinitura del tessuto i filamenti tendevano a riassumere la configurazione a elica corrispondente alla deformazione permanente precedentemente imposta. Da allora il processo è stato molto perfezionato, tanto che ora esistono macchine per la torsione temporanea (o « falsa torsione ») a lavorazione continua, anziché in fasi successive, con velocità superiori a 600 000 giri al minuto.

La testurizzazione ha l'effetto di impartire al filato aumento di volume, arricciatura e elasticità. Il tessuto a maglia doppia *(in alto)* è prodotto con un filato in poliestere testurizzato: si notino le ondulazioni dei filamenti. Il tessuto in poliestere *(al centro)* ha una trama testurizzata *(fili orizzontali)* e un ordito non testurizzato. La maglieria « stretch », cioè elasticizzata, *(in basso)* è un tessuto a maglia di nylon testurizzato.

Un altro processo di testurizzazione, mediante arricciatura, divenuto impiegabile su scala commerciale verso il 1955, sfrutta il principio spesso usato dai confezionatori di pacchi da regalo che raschiano le estremità del nastro con una lama affilata per farlo arricciare. I filati testurizzati secondo questo processo, che venne sviluppato indipendentemente in Gran Bretagna e negli Stati Uniti, sono nati con la denominazione commerciale di filati Agilon. Il processo è simile ad altri schemi di testurizzazione poiché deforma i filamenti rispetto alla loro primitiva configurazione lineare e impiega il calore per rilassare la fibra e sviluppare nuovi legami molecolari privi di sollecitazioni allo stato deformato. L'applicazione del calore ha semplicemente lo scopo di migliorare la permanenza della deformazione in presenza di sollecitazioni, calore e umidità futuri.

Un terzo metodo per produrre filati modificati dal filo continuo deriva dalla tecnica della scatola di compressione prima citata per arricciare le fibre derivate dal fiocco. I filamenti vengono arricciati nella scatola di compressione con un tempo di contatto e una temperatura tali da determinare un elevato grado di stabilizzazione della deformazione imposta con l'azione del calore. Tessuti e indumenti che portano il nome depositato « Ban-Lon » sono fabbricati con filati testurizzati secondo il metodo della scatola di compressione.

La testurizzazione può essere anche ottenuta con un interessante processo di tessitura e dipanatura del tessuto per produrre filati arricciati. Il filato termoplastico viene lavorato a maglia sotto forma di un tessuto tubolare, termofissato e successivamente dipanato e avvolto su bobine per essere tessuto.

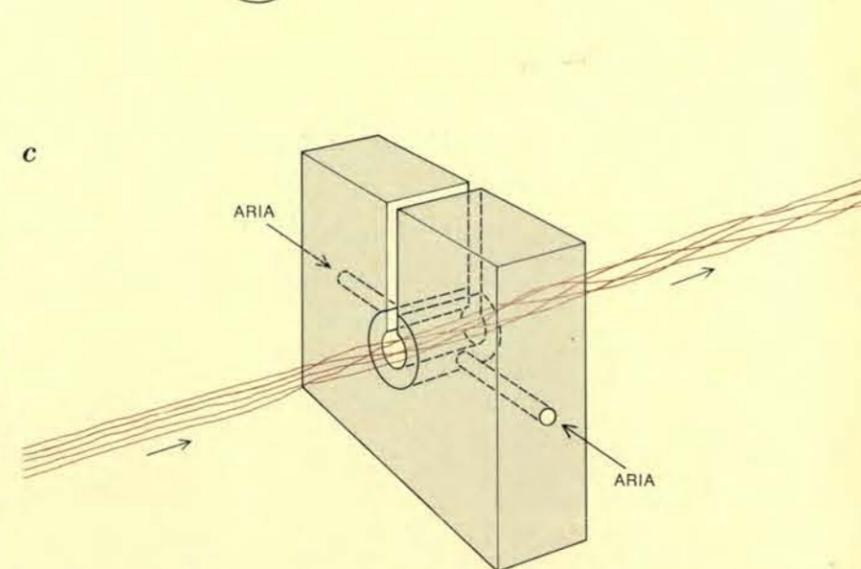
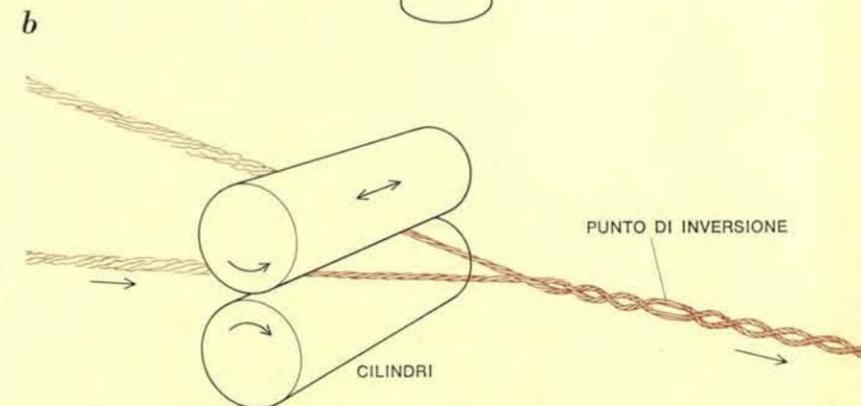
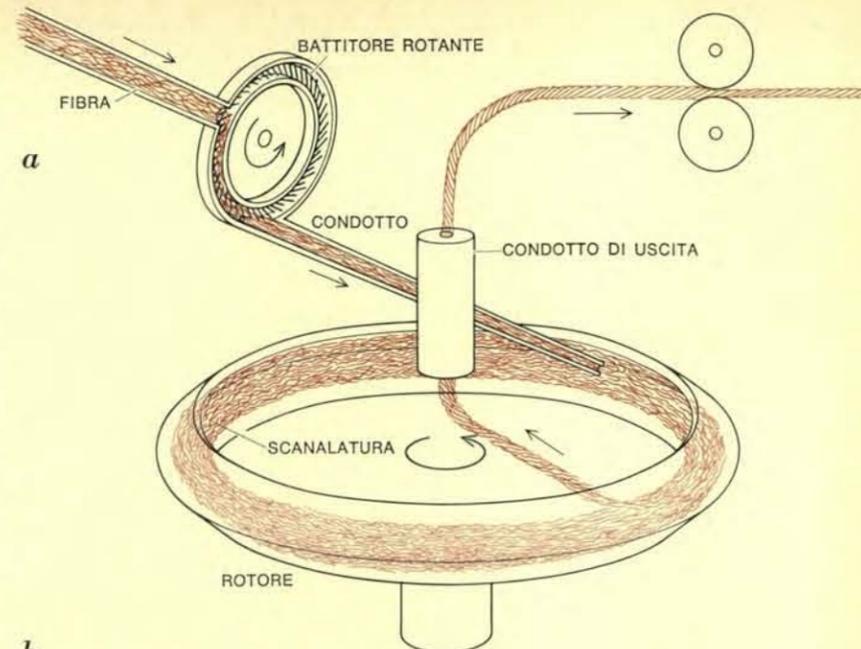
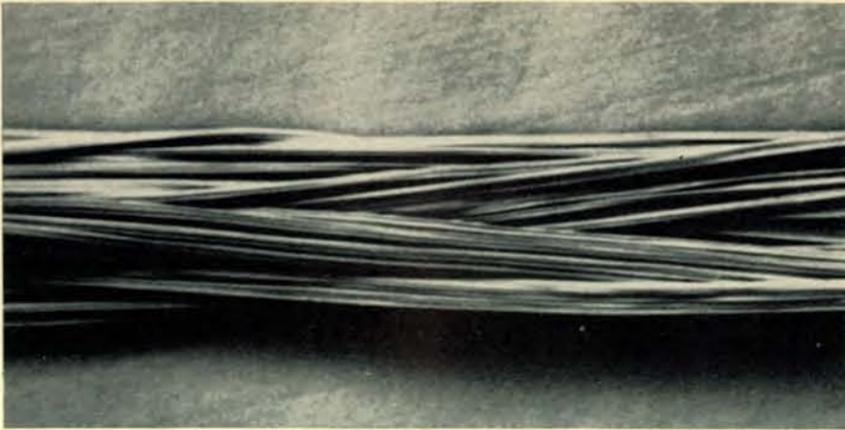
Il fatto che un fabbricante, pur mantenendosi competitivo, possa produrre un tessuto e poi dipanarlo (per ottenere un filato che « ricorda » la sua forma arricciata) fa ritenere che la lavorazione circolare a maglia prima citata sia un processo efficiente e di basso costo. E fa ritenere pure che altri tipi di testurizzazione possano essere più costosi. In ogni modo la richiesta di filati arricciati o tessuti dipanati, che impartiscono un aspetto irregolare o *bouclé* alla superficie delle stoffe, è in espansione.

Un altro metodo per modificare un filato derivato da un filo continuo è la testurizzazione a getto d'aria. Tenuto conto dell'elevato rapporto fra superficie e volume delle fibre tessili, non sorprende affatto che le correnti di aria siano state usate per molti anni per trasportare fibre singole da una macchina all'altra o anche all'interno della stessa macchina. Recentemente sono stati messi a punto un certo numero di processi per far passare i fili attraverso getti d'aria allo scopo di arricciarli. Nel processo Taslan, per esempio, il filo viene immesso in una veloce corrente d'aria nella sezione minima di un ugello; esso è poi sottoposto alla turbolenza dell'aria nella successiva zona ove la sezione si allarga, formando dei cappi che si aggrovigliano fra loro. Si ottiene così un filato ammassato costituito da un nucleo piuttosto compatto e intricato con numerosi cappi che fuoriescono dalla superficie. La densità del nucleo rende il filato più resistente all'allungamento della maggior parte dei filati testurizzati, e quindi adatto per confezionare tessuti che richiedano una stabilità dimensionale, una considerevole opacità e una maggiore quantità di peli in superficie.

L'arricciatura con ingranaggi è un metodo ormai classico per impartire la ondulazione alle fibre chimiche. Facendo scorrere il tow o le fibre singole fra i denti riscaldati di un ingranaggio, si impartisce una struttura a zig-zag e un'ondulazione planare più o meno forte. La planarità dell'ondulazione presenta lo svantaggio di dare filati meno densi e allungabili dei filati prodotti con altri metodi che impongono una arricciatura tridimensionale.

Poche cifre sono sufficienti per dare un'idea dell'importanza raggiunta dai processi di testurizzazione nella fabbricazione dei filati. Nel 1970 la produzione statunitense di nylon testurizzato è stata di circa 68 000 tonnellate: di queste 51 000 sono state preparate con il processo della falsa torsione, 10 500 con il sistema a compressione e 3600 con il metodo di tessitura e dipanatura. Nello stesso anno la produzione di poliestere testurizzato ha raggiunto 94 000 tonnellate, delle quali il 95 per cento è stato prodotto con il processo della falsa torsione. La produzione di tutti i tipi di filati sintetici testurizzati è salita nel 1971 a 340 000 tonnellate.

Attuali orientamenti nella tecnologia dei filati

Si è detto sopra che il filatoio a cursore e anello è diventato il metodo più diffuso per la filatura di fibre in fiocco. Malgrado le numerose ricerche per aumentare il rendimento di queste macchine, il filatoio ad anello resta ancora uno dei più costosi processi di filatura. Di conseguenza gli sviluppi più recenti sono orientati verso la sostituzio-

Recenti sviluppi hanno eliminato la filatura ad anello migliorando il rendimento di avvolgimento. Nel filatoio « open-end » *(a)* il fascio di fibre viene separato da un battitore, le fibre singole sono avviate mediante una corrente d'aria in un rotore e lanciate per forza centrifuga in una scanalatura a *V*. Il rotore trascina in tondo l'estremità « aperta » del filo appena formato torcendolo; il filo si allunga mano a mano che alla estremità aperta si aggiungono fibre sciolte che si trovano nella scanalatura. Nell'autotorcitura *(b)* una serie di rulli impone una torcitura alternata nei due sensi a due stoppini che tendono a svolgersi per effetto della tensione: poiché sono contigui si impigliano fra loro, formando un filo autoritorto a due capi. Nel processo senza torsione *(c)* un getto d'aria aggroviglia casualmente i filamenti continui formando un filo.

Il filo intrecciato derivato da una fibra di acetato con il processo a getto d'aria illustrato nella pagina precedente, è compatto, diritto e senza arricciature o cappi.

ne sia del filatoio ad anello sia dei torcitoi e perfino verso l'eliminazione della torcitura.

Molti tecnologi considerano essenziale la torcitura, soprattutto per i filati derivati dal fiocco; hanno quindi tentato dapprima di trovare un modo per impartire una torsione effettiva senza ruotare l'intero dispositivo, operazione che è caratteristica del filatoio a cursore e anello. Due sono state le soluzioni escogitate: il filatoio « open-end » e il metodo dell'autotorcitura (*si veda la illustrazione nella pagina precedente*).

Il filatoio open-end è stato oggetto di intensi studi negli ultimi cinque anni e recentemente sono apparse sul mercato macchine progettate in Cecoslovacchia e in Giappone. Il processo, detto anche a filatura interrotta, differisce dal metodo classico in quanto il percorso delle fibre viene interrotto proprio prima della torcitura, rendendo possibile la rotazione dell'estremità del nastro che si trova immediatamente dopo il punto di interruzione e di imporre la torsione al nastro stesso più a valle. Le nuove fibre che si trovano a monte vengono trasportate elettrostaticamente o con una corrente d'aria verso il nastro a valle dove sono intrecciate e avvolte con le fibre dell'estremità del nastro stesso.

La filatura open-end deve ancora affermarsi su larga scala negli Stati Uniti, ma sembra che abbia molte possibilità di riuscirvi. Il metodo, nell'attuale fase di sviluppo, è due o tre volte più veloce della filatura ad anello, e anche meno rumoroso e produce minor quantità di scarti. Tenuto conto che negli Stati Uniti esistono molti milioni di fusi montati su banchi di filatura ad anello con un investimento unitario superiore a 30 dollari (circa 18 000 lire), non è probabile che la conversione in filatoi open-end possa avvenire entro breve tempo, sebbene per certi filati si tenda già ad adottare questo nuovo metodo.

L'autotorcitura è stata sviluppata in Australia, dove si eseguono molte ricerche sulla lana. Due stoppini di lana vengono fatti passare fra una coppia di cilindri dotati di due movimenti: uno di rotazione continua come i cilindri convenzionali e uno di va e vieni laterale. Quest'ultimo moto torce e aumenta la densità degli stoppini durante il loro passaggio, imponendo a ciascuno di loro una torcitura alternata nei due sensi: quando due stoppini adiacenti vengono posti a contatto tendono ad avvolgersi parzialmente uno sull'altro e a impigliarsi fra loro. Quando cessa la pressione di contatto i due stoppini tendono a svolgersi, ma a causa dell'intrecciatura già avvenuta si piegano l'uno sull'altro fino a minimizzare l'energia di torsione e di piegatura posseduta dal sistema, cioè fino a quando il filo raggiunge una configurazione di equilibrio. Con questo sistema gli stoppini singoli vengono trasformati in un filo a due capi senza far ruotare tutto il dispositivo di filatura.

Per conferire la necessaria resistenza ai filati derivati dal fiocco occorre una notevole torsione, mentre ai filati ottenuti da filo continuo basta una torsione piuttosto leggera (da 1/8 a 1/5 di giro per centimetro), cioè quanto è sufficiente per mantenere insieme i filamenti durante la tessitura. Nei filatoi ad anello perfino livelli di torsione così bassi non potrebbero essere imposti a velocità superiori a 550-650 metri al minuto: per questo motivo i fabbricanti erano impazienti di trovare nuovi sistemi per mantenere uniti i filamenti. Un metodo che ha avuto successo è basato su ugelli ad aria: attraverso un fascio di filamenti viene fatta passare una corrente d'aria che separa i gruppi di filamenti o i singoli filamenti uno dall'altro, mescolandoli poi nella direzione della lunghezza. Al fascio viene cosí impartita una coesione, ottenendo una treccia di filo. Si è in tal modo riusciti a raggiungere velocità di produzione superiori a 2700 metri al minuto e, nello stesso tempo, a sostituire i grossi e complicati banchi di torcitura con dei piccoli e relativamente semplici ugelli ad aria.

I filati accoppiati rappresentano una struttura di nuovo tipo. Un filato accoppiato è costituito da un nucleo di fibre derivate dal fiocco disposte parallele e di eccezionale lunghezza (da 12 a 15 centimetri) legate a intervalli con una piccola parte delle medesime fibre che compongono il filo. Un getto aspirante trascina lo stoppino costituito di lunghe fibre ottenute dal fiocco in un getto torcente che ne colpisce tangenzialmente la superficie periferica, imprimendo in tal modo una falsa torsione. Poiché lo stoppino è discontinuo, in confronto al filo continuo su cui lavorano le normali macchine per la torcitura temporanea, alcune fibre esterne non vengono inizialmente ritorte quanto quelle del nucleo. Passando attraverso il getto esse vengono tuttavia ritorte in senso contrario piú di quanto non avvenga alle fibre del nucleo, che la corrente d'aria ha ora rese parallele.

La struttura del filo accoppiato assicura ai tessuti particolari proprietà, grazie alle fibre lunghe e parallele e alle legature. I filati fasciati sono piú accurati, meno pelosi e piú lucenti dei filati prodotti con filatoi ad anello. Essi rappresentano il prodotto di una tecnologia tessile avanzata e sarà interessante vedere quale influsso avranno sul mercato.

Un'altra forma di struttura senza torsione è il filo collato nel quale le fibre derivate dal fiocco sono temporaneamente tenute insieme con un adesivo. L'adesivo viene asportato dopo la tessitura, quando cioè il filato ha raggiunto sufficiente resistenza per l'intreccio della stoffa. I tessuti prodotti con filati collati presentano buona resistenza, lucentezza, morbidezza e caratteristiche di resistenza all'usura e al lavaggio piú che accettabili. Il processo di incollaggio promette una produzione veloce ed economica, ma occorreranno ancora alcuni anni prima che tale metodo possa essere impiegato su larga scala.

I filati da film

Si possono produrre filati di tipo particolare tagliando longitudinalmente fogli continui di un polimero in film. Il processo è basato sul principio che l'allungamento di un film costituito da un polimero, quale per esempio il polipropilene, conferisce una notevole resistenza lungo la direzione di stiro accompagnata da un indebolimento nella direzione ortogonale. Il film può quindi essere diviso o tagliato in nastri per applicazioni industriali di robustezza e resistenza paragonabili a quelle delle fibre naturali (sulla base del rapporto resistenza/costo). Il principale uso delle bandelle di polipropilene è come supporto nei tappeti; vi sono in effetti buone probabilità che entro tre o quattro anni una metà dei tappeti venduti negli Stati Uniti abbiano un supporto in polipropilene. Nastri o fibre grossolane in polipropilene servono anche come erba artificiale nella maggior parte delle moquettes erbose sintetiche messe in opera negli Stati Uniti.

Si è sentito anche parlare di filati da film che sono stati fibrillati, cioè resi maggiormente simili a fibre mediante una lavorazione meccanica. Tuttavia i progressi in questa direzione non sono stati molto incoraggianti per la difficoltà di controllare la sezione del filato e per le tendenze di questo a continuare il processo di fibrillazione dopo l'incorporazione in un tessuto. Inoltre la riduzione di costo che si è ottenuta è stata inferiore alle aspettative iniziali.

Alcuni anni fa si cercò di utilizzare la tendenza alla fibrillazione del polietilene fortemente stirato in modo alquanto insolito ottenendo filati chiamati a rete. Si tratta di un filato costituito da fibre che formano una rete avente i punti nodali a una distanza di circa 1,5 centimetri uno dall'altro. Il diametro medio delle fibre è inferiore a quattro micron, e quindi piccolo in confronto al diametro medio di 20 micron delle fibre che compongono i filati usati per i capi di abbigliamento. I filati a rete che vengono prodotti attualmente possono essere tessuti o lavorati a maglia ricavando stoffe accettabili al tatto e alla vista.

Un altro metodo per produrre un filato tessile ad alta velocità e a basso costo è rappresentato dai filati misti, apparsi lo scorso anno in commercio. Si tratta di un sistema in cui un polimero sintetico, per esempio polietilene, viene estruso a velocità assai superiori a 300 metri al minuto e accoppiato a caldo con fibre convenzionali derivate dal fiocco che vengono alimentate in equicorrente. Il risultato è sostanzialmente un filo ruvido la cui tenacità, in assenza di torsione, è dovuta all'anima di polimero, e che nel contempo ha la caratteristica superficie coperta di peli del filo filato.

Come cacciano gli scimpanzé

Osservazioni eseguite su scimpanzé selvatici hanno rilevato che questi animali non si nutrono solo di vegetali, ma cacciano i piccoli mammiferi. Possiedono inoltre un cerimoniale ben sviluppato per spartirsi la caccia

di Geza Teleki

Molti ritengono che tutte le scimmie, comprese quelle antropomorfe, siano vegetariane e che l'uomo sia l'unico primate capace di cacciare gli altri animali. Questa ipotesi aveva influenzato notevolmente le teorie sull'evoluzione dell'uomo formulate quando non si era ancora cominciato a studiare le scimmie antropomorfe allo stato selvatico. Per esempio, era stato suggerito che l'associarsi per la caccia e la successiva spartizione della preda fossero stati dei fattori chiave per la divergenza dei primi ominidi dagli altri primati che si trovavano sulla stessa linea evolutiva.

Attualmente, dopo quarant'anni di osservazioni eseguite su tutte le specie di scimmie nel loro ambiente naturale, si può affermare con sicurezza che l'uomo non è l'unico primate che caccia e si nutre di carne. Molti altri primati infatti sono omnivori. Uno in particolare, lo scimpanzé, non solo si associa con i suoi simili per le battute di caccia, ma dopo aver catturato la preda la spartisce secondo un cerimoniale sociale ben organizzato. In particolare è stato studiato il comportamento degli scimpanzé che vivono allo stato semiselvatico nel Parco nazionale di Gombe nella Tanzania occidentale. In questa area, conosciuta come riserva di scimpanzé di Gombe, Jane van Lawick-Goodall iniziò il suo importante studio a lungo termine sugli scimpanzé nel 1960. Io stesso trascorsi 12 mesi in questa riserva studiando il comportamento di caccia di queste scimmie antropomorfe dal 1968 al 1969.

Il parco di Gombe si estende su una superficie di circa 55 chilometri quadrati e possiede una popolazione stimata di 150 scimpanzé tutti appartenenti alla sottospecie *Pan troglodytes schweinfurthii*. Goodall e i suoi colleghi divennero ben presto capaci di distinguere tra loro una cinquantina di individui che abitavano una zona di circa 18 chilometri quadrati a cavallo della valle di Kakombe. Questa zona divenne l'area principale di studio e i suoi scimpanzé divennero oggetto di osservazioni quotidiane che sono state portate avanti per piú di 10 anni.

Gli studiosi si resero subito conto che la popolazione di scimpanzé era organizzata secondo una gerarchia sociale a capo della quale stava il maschio piú anziano di tutto il gruppo. La maggior parte dei maschi adulti e anche qualche maschio giovane dominavano le femmine di qualunqne età fossero. Il comportamento delle femmine dimostrò in parecchi casi che anche tra di esse esisteva una gerarchia indipendente. Tra il 1960 e il 1970 la carica di maschio piú anziano o « alfa » fu assunta successivamente da due individui. Durante i 12 mesi da me trascorsi nel parco il capo era uno scimpanzé che la Goodall aveva chiamato Mike.

Sherwood L. Washburn e Irven De-Vore dell'Università della California a Berkeley furono tra i primi a osservare che i primati mangiavano carne. Studiando i babbuini del Kenia nel 1959 li videro uccidere e mangiare le antilopi nate da poco. Poco tempo dopo, la Goodall poté affermare con sicurezza che anche gli scimpanzé erano omnivori. La loro dieta comprendeva insetti, lucertole, uova di uccelli e uccellini, giovani antilopi, scimmie azzurre, scimmie dalla coda rossa, colobi e babbuini molto giovani o appena nati. Contemporaneamente altre osservazioni eseguite su varie specie di primati in tutto il mondo hanno dimostrato che la dieta di tipo omnivoro non è affatto insolita. Verso la fine del 1960 l'elenco di primati che si nutrono di animali aventi dimensioni di gran lunga superiori a quelle degli insetti, comprendeva due popolazioni di scimpanzé osservate al di fuori del parco di Gombe, due specie di babbuini oltre a quella sopra nominata in Africa, i macachi del Giappone e le scimmie lanose e i cebi cappuccini del Nuovo Mondo. Solo gli scimpanzé e i babbuini però sembra che caccino attivamente le loro prede.

Nei dieci anni trascorsi a studiare le popolazioni di scimpanzé del parco di Gombe, la Goodall e molti altri studiosi, me compreso, poterono osservare che i 50 scimpanzé che abitavano la valle di Kakombe in vicinanza del nostro posto di osservazione, uccisero e mangiarono non meno di 95 mammiferi e cercarono di catturarne altri 37 che però riuscirono a fuggire. 46 episodi di caccia furono osservati direttamente, 38 furono stabiliti in base ai resti rinvenuti nelle feci degli scimpanzé, mentre alcuni resti di 11 prede, trasportati dagli scimpanzé, furono notati da alcuni di noi.

Durante l'anno da me trascorso a Gombe, fui spettatore di 30 episodi di caccia, 12 dei quali conclusi felicemente (per gli scimpanzé). Complessivamente nei dieci anni di osservazioni, fu possibile assistere in media all'uccisione di 9 mammiferi all'anno. Il fatto che io, in un solo anno, abbia potuto assistere a 30 episodi di caccia e a 12 uccisioni, non significa che quell'an-

Nella fotografia della pagina a fronte si può vedere uno scimpanzé della Tanzania in un tipico comportamento di quella fase socialmente organizzata che segue una caccia fortunata e consiste nella spartizione della preda con altri membri del branco. L'animale che l'ha catturata fa capire che non la vuole dividere con un altro scimpanzé che si trova un po' piú in alto sull'albero, allontanandosi un poco. Generalmente però quasi tutti gli scimpanzé che chiedono un pezzo di carne vengono accontentati.

no sia stato particolarmente dedito alla caccia bensí che durante gli altri anni parecchi episodi di caccia siano sfuggiti agli osservatori. Per quanto riguarda i babbuini come preda, invece, l'anno da me trascorso a Gombe fu eccezionale. I rapporti eseguiti dalla Goodall durante i dieci anni trascorsi nel parco dimostrano che furono identificate 56 delle 95 prede catturate. Prevalevano altri primati tra cui 14 colobi, 21 babbuini, una scimmia azzurra e una dalla coda rossa. Gli altri 19 mammiferi identificati erano 10 cinghiali e 9 antilopi tutti nati da poco. Io invece osservai in 10 casi su 12 l'uccisione di babbuini. Inoltre assistetti ad altri 18 episodi di caccia che non ebbero successo e che riguardavano tutti babbuini. Tutte le specie di mammiferi che ho menzionate come prede degli scimpanzé erano in realtà anche le uniche disponibili a Gombe, per cui non rispecchiano esattamente le preferenze di questi primati, ma anzi dimostrano che gli scimpanzé tendevano a catturare le prede piú varie. In effetti, l'unico limite che essi si ponevano era la dimensione della preda. Non abbiamo mai visto uno scimpanzé catturare o anche solo inseguire animali che pesassero piú di 10 chili. Per esempio, la maggior parte dei babbuini catturati erano individui giovani che pesavano circa 5 chilogrammi o meno. Anche le antilopi e i cinghiali erano molto giovani o appena nati. Solo pochi mammiferi adulti uccisi dagli scimpanzé di Gombe pesavano piú di 10 chili ed erano colobi, scimmie azzurre o scimmie dalla coda rossa.

I babbuini erano la preda piú frequente degli scimpanzé da noi osservati probabilmente solo perché queste due specie avevano maggiori probabilità d'incontrarsi. Entrambe infatti vivono nello stesso habitat, attraversano la prateria e la foresta utilizzando gli stessi percorsi e hanno numerosi tipi di cibo in comune. Spesso inoltre entrano in competizione tra loro per difendere qualche luogo particolare come, per esempio, un albero da frutta. D'altra parte generalmente si comportano in maniera molto amichevole spulciandosi o giocando insieme. Nei 12 mesi da me trascorsi a Gombe potei osservare quasi tutti i giorni gruppi di giovani scimpanzé e di babbuini che giocavano tra loro. In due occasioni vidi uno scimpanzé maschio adulto inseguire e catturare un giovane babbuino che fino a pochi istanti prima aveva giocato insieme ai giovani scimpanzé sotto lo sguardo benevolo delle femmine delle due specie che erano sedute a breve distanza.

Questo particolare tipo di comportamento tra scimpanzé e babbuini potrebbe essere anormale e avvenire solo a Gombe. Nelle altre località dell'Africa, si sa che i babbuini adulti difendono la prole anche dai grandi carnivori, riuscendo a ferire gravemente persino i leopardi. Io stesso ho osservato un branco di babbuini a Gombe uccidere un gatto selvatico del peso di 17 chilogrammi che sembrava minacciarli.

L'atteggiamento dei babbuini nei confronti degli scimpanzé che cercano di catturarli sembra alquanto ambivalente. Ho visto un babbuino maschio adulto sedere spalla a spalla con tre scimpanzé maschi adulti che si stavano dividendo una carcassa di antilope mentre gli altri babbuini e scimpanzé del branco si contendevano sui rami sottostanti i pezzi di carne che cadevano. Ho anche visto però uno scimpanzé alzarsi e correre all'inseguimento di un branco di babbuini in mezzo a cui scelse e catturò un giovane individuo ostentando completa indifferenza nei confronti dei numerosi adulti che cercavano di allontanarlo colpendolo e saltando sulla sua schiena. Tutti gli episodi del genere osservati a Gombe dimostrano che i babbuini che si difendono da uno scimpanzé non lo feriscono mai in maniera grave riuscendo al massimo solo ad allontanarlo.

Forse è proprio la varietà e la frequenza dei rapporti sociali esistenti tra gli scimpanzé e i babbuini di Gombe a provocare lo strano comportamento di questi ultimi. Il fatto di avere in comune percorsi e zone foraggere, la mutua comprensione di diversi segnali e l'abitudine al gioco in comune degli individui giovani, hanno creato un'atmosfera particolare per cui i babbuini si sentono quasi piú vicini agli scimpanzé che ad altre popolazioni di babbuini. Che qualcosa di simile sia potuto accadere è dimostrato dalle seguenti osservazioni. Un giorno un babbuino fu ferito mortalmente da altri membri del suo branco sotto gli occhi di alcuni scimpanzé. Questi ultimi, invece di considerarlo una preda da spartire, si avvicinarono al cadavere, lo toccarono e quindi si misero a ripulirlo, dimostrando un comportamento identico a quello assunto nei confronti di un morto della loro stessa specie.

Come è stato osservato anche tra gli scimpanzé di Gombe, la caccia è un'attività esclusiva dei maschi adulti. In qualche caso si sono viste delle femmine inseguire e catturare delle prede, ma in questi casi non c'era alcun maschio in vicinanza. I maschi possono cacciare da soli oppure associarsi con uno o due compagni. Una volta vidi con i miei occhi cinque maschi circondare tre babbuini che si erano rifugiati sugli alberi; gli scimpanzé agivano chiaramente secondo un piano prestabilito.

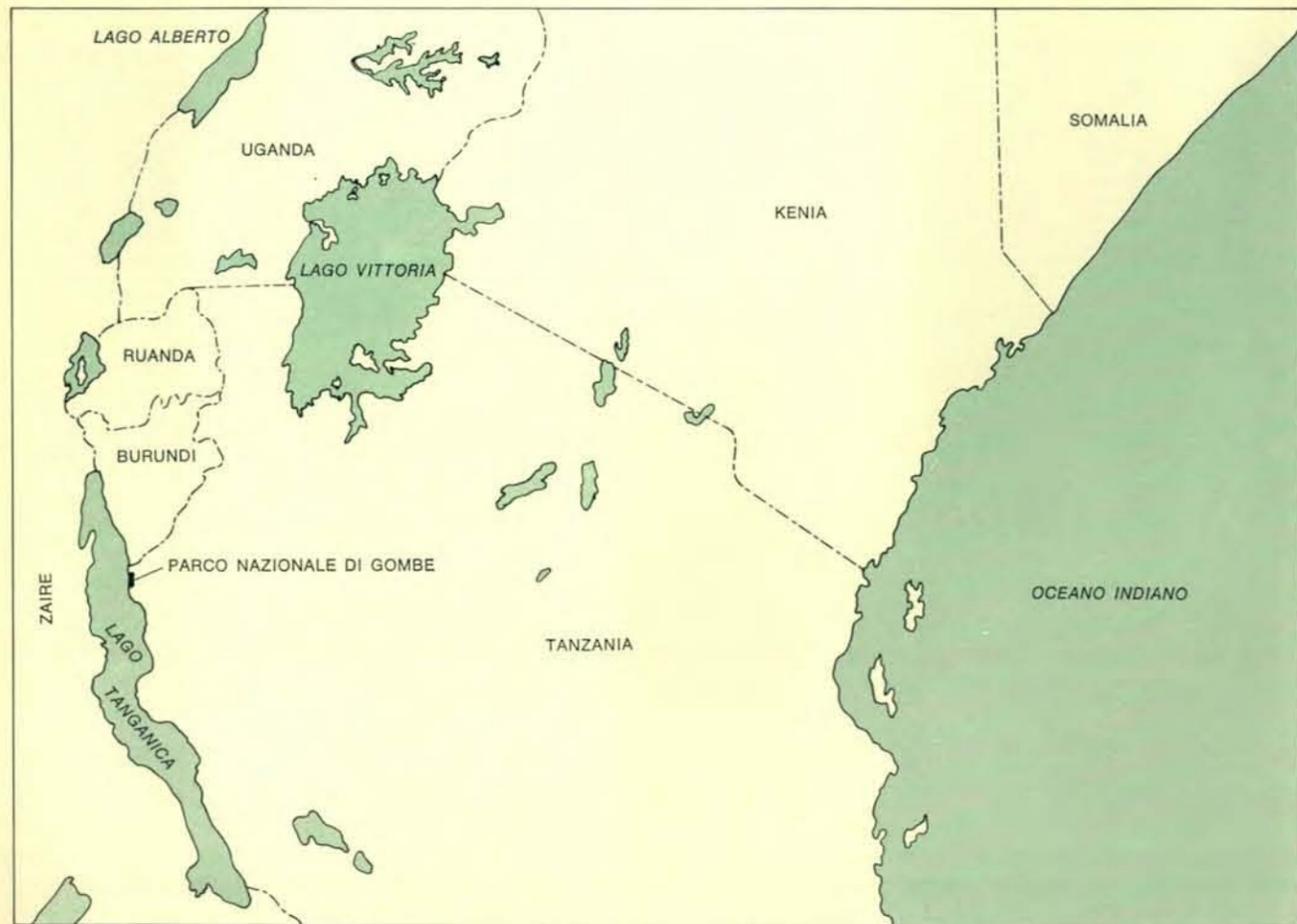
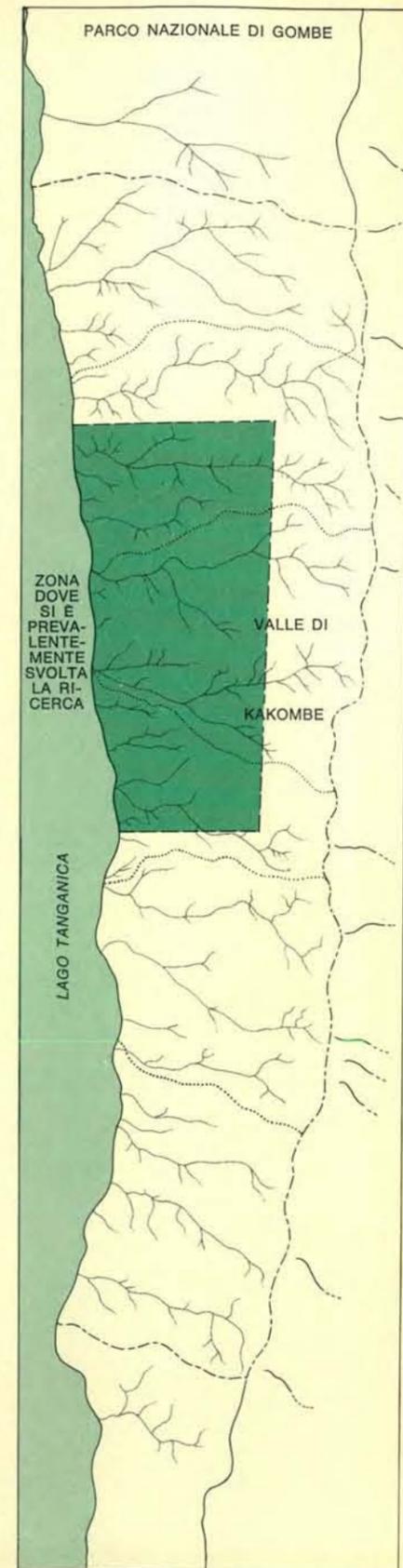
Un episodio di caccia che termini con l'uccisione della preda, presenta tipicamente la seguente successione di avvenimenti: dapprima si ha l'inseguimento anche se in alcuni casi la distanza da coprire è di soli pochi metri e il tempo impiegato è di pochi secondi. Successivamente si ha la cattura sempre molto rapida che termina con il primo smembramento della preda, piú tardi e piú lentamente si ha la « consumazione » del cibo secondo un cerimoniale altamente organizzato. Potei assistere a una di queste ultime fasi che durò ben nove ore e coinvolse 15 scimpanzé.

La durata media di 12 episodi di caccia cui potetti assistere è inferiore alle 4 ore, il piú breve da me osservato durò un'ora e 45 minuti. Quando lo scimpanzé non riesce a uccidere la preda, naturalmente, tutto si svolge con piú rapidità. La durata media dei 18 tentativi cui assistetti era di 12 minuti. Gli scimpanzé di Gombe passano piú del 90 per cento del loro tempo dedicato alla caccia nello spartirsi e nel consumare la preda.

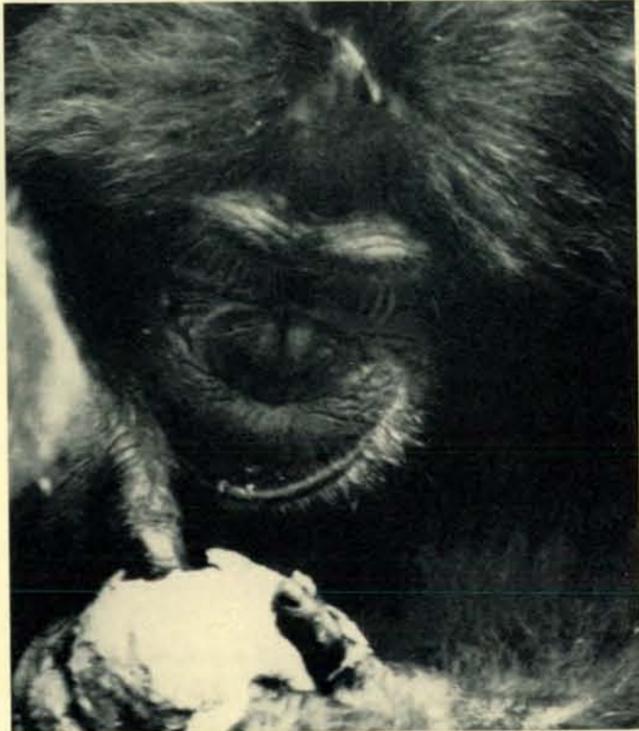
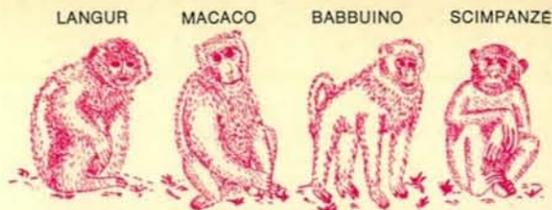
Non mi capitò mai l'occasione di assistere all'inizio di un episodio di caccia, cosicché non posso descrivere con certezza come inizi l'inseguimento. Quando sia la preda che il predatore sono in vista, sembra che lo scimpanzé scelga la vittima predestinata ancor prima di iniziare l'inseguimento. Tuttavia le variazioni della posizione e dell'atteggiamento sono cosí tenui che è difficile descriverle accuratamente.

Diversi inseguimenti possono iniziare quando uno scimpanzé è perfettamente rilassato, quando si spulcia o dormicchia, per esempio, oppure quando si riposa dopo aver mangiato grandi quantità di frutta. Piú raramente la caccia inizia quando gli scimpanzé sono impegnati in attività sociali o stanno litigando con altre specie di primati. Nel caso in cui la preda è un babbuino, sembra che lo stimolo all'inseguimento sia il richiamo di un babbuino giovane. Questo grido, che ha sia significato di aggressione che di paura, viene spesso emesso durante i giochi dei giovani babbuini o quando un piccolo chiama sua madre. In piú della metà dei 28 episodi di caccia a cui assistetti e in cui erano coinvolti dei babbuini, l'interesse dello scimpanzé verso la preda sembrava che fosse destato da un grido di un giovane babbuino.

L'inseguimento e la cattura della preda sono generalmente fulminei e non richiedono alcun tipo di preliminare. Lo scimpanzé di solito approfitta di qualche occasione fortuita per fare un balzo improvviso e catturare la preda. Si può affermare che lo scimpanzé uccide tutte le volte che gli si presenta una preda che non ha la possibilità di fuggire, come un uccellino incapace di volare o un'antilope appena nata. Questo tipo di cattura è assai frequente, lo vidi realizzare 22 volte su 30 episodi di caccia di cui fui spettatore.

Gli scimpanzé di Gombe adottano anche altri due tipi di cattura. Si ha un vero e proprio inseguimento quan-

Il Parco nazionale di Gombe dove è stato studiato il comportamento di caccia degli scimpanzé si estende lungo le rive del lago Tanganica. Le ricerche sono state condotte da Jane van Lawick-Goodall e portate avanti ininterrottamente dal 1960.

L'area principale dove è stata condotta la ricerca nel Parco nazionale di Gombe è una zona di 18 chilometri quadrati, all'interno e nei dintorni della valle di Kakombe, in cui almeno 50, dei 150 scimpanzé che abitano il parco, si procurano il cibo.

Uno scimpanzé che ha catturato un babbuino comincia a smembrare la parte di preda che è riuscito a tenere per sé: la metà anteriore. Quasi tutti i cacciatori sono scimpanzé maschi e adulti. In media ogni tentativo di caccia su tre ha successo.

Uno scimpanzé di Gombe frantuma con i denti l'osso frontale di un babbuino per raggiungere il cervello (*a sinistra*). Quindi estrae con un dito questo cibo particolarmente apprezzato (*a destra*). Altri bocconi possono venir spartiti, ma mai il cervello.

	LANGUR	MACACO	BABBUINO	SCIMPANZÉ
FOGLIE, FRUTTA, BACCHE, BOCCIOLI, GERMOGLI, CORTECCIA, LEGNO TENERO, ERBA, RIZOMI, BAMBÙ	■	■	■	■
NOCI, SEMI, BACCELLI, GRANI		■	■	■
RADICI, BULBI		■	■	
FUNGHI			■	■
MIELE				■
INSETTI	■	■	■	■
SCORPIONI			■	
MOLLUSCHI		■	■	
PESCI, GRANCHI		■	■	
RETTILI			■	■
UCCELLI, UOVA			■	■
PRIMATI			■	■
ANTILOPI			■	■
RODITORI			■	
CINGHIALI				■

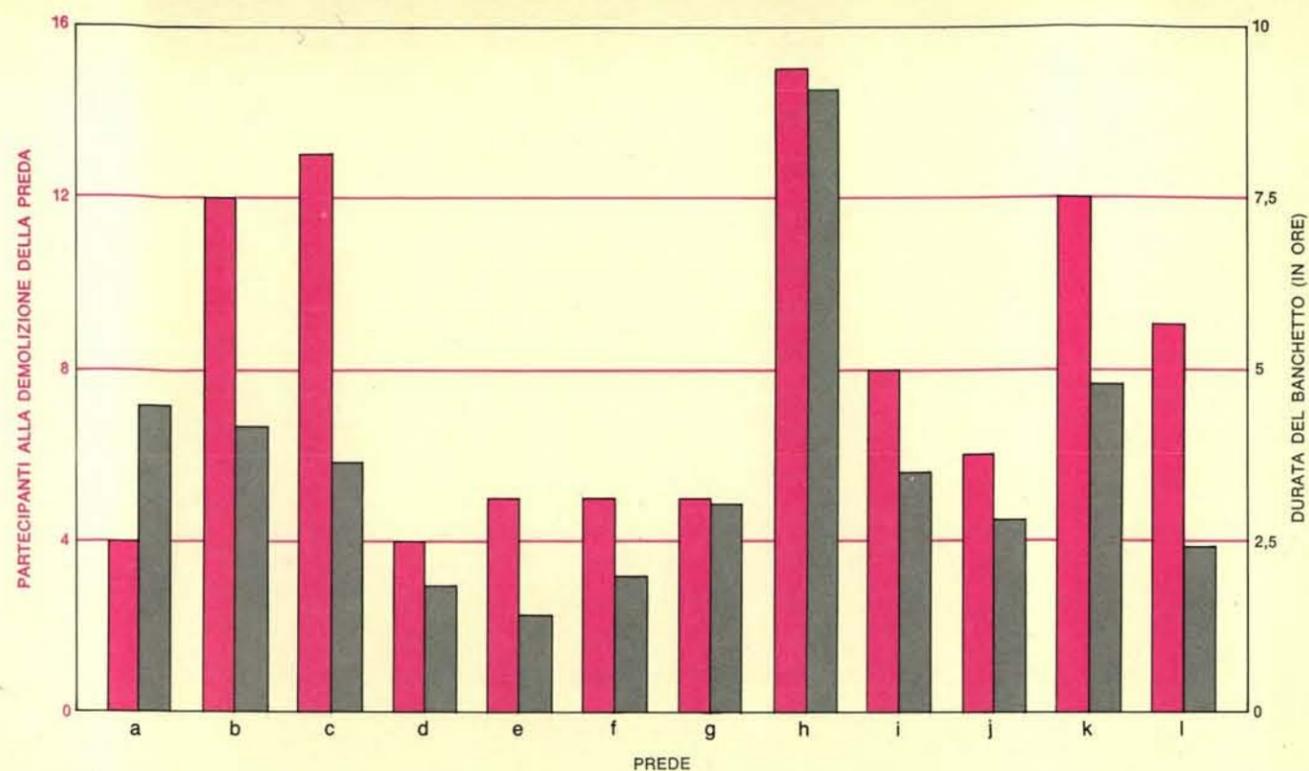
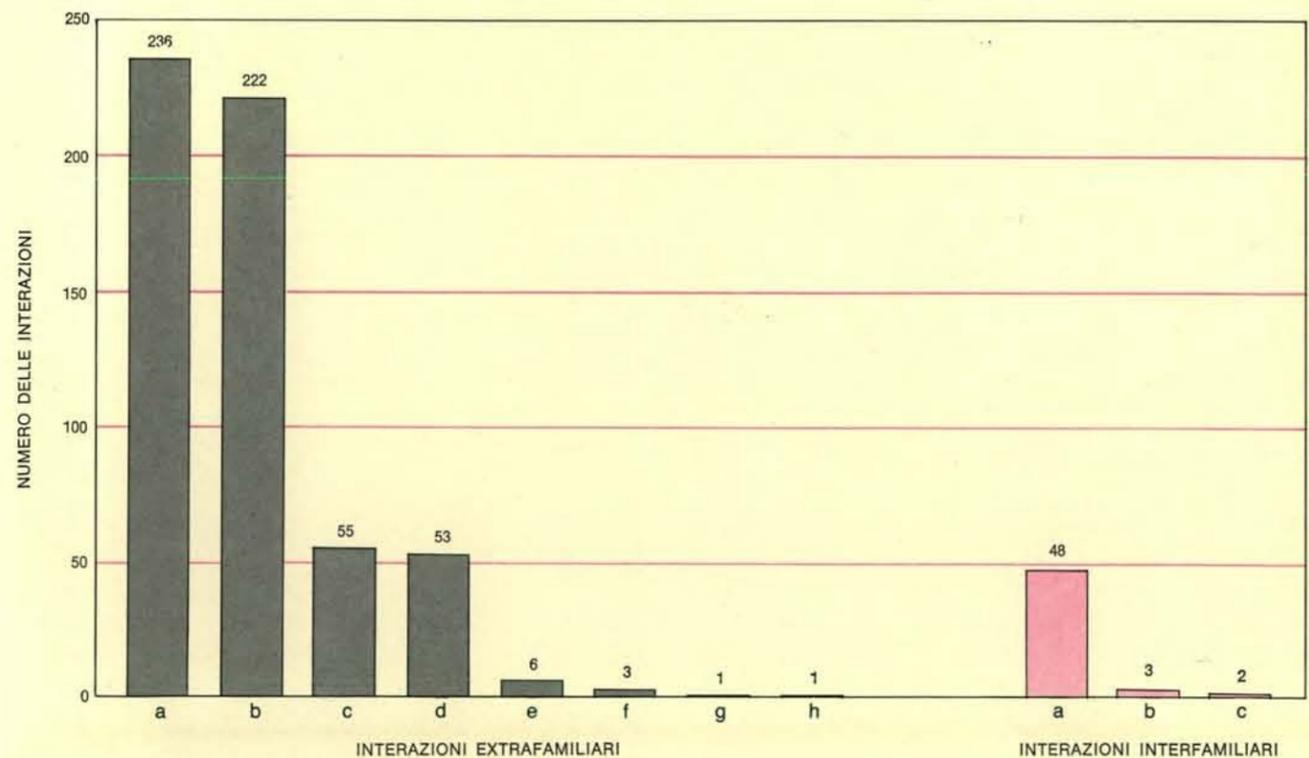
La dieta omnivora degli scimpanzé e di altre tre scimmie del vecchio mondo ha in comune vari tipi di vegetali, ma un solo gruppo di animali: gli insetti. Delle quattro specie considerate solo i babbuini e gli scimpanzé cacciano e divorano altri mammiferi.

do la distanza che li separa dalla preda è di almeno 100 metri. Un altro sistema è quello di un prudente e lungo appostamento che può durare anche piú di un'ora. Entrambi i metodi sembra richiedano un controllo e una premeditazione di gran lunga superiori al piú semplice tipo di caccia precedentemente descritto. Gli scimpanzé infatti in questi due ultimi casi devono far uso di una vera e propria strategia per isolare e mettere nell'impossibilità di fuggire la preda. Io ho osservato 11 episodi di caccia in cui si aveva un lungo inseguimento di cui 6 ebbero successo, e 4 appostamenti tutti falliti.

A volte, particolarmente la mattina presto e la sera, gli scimpanzé sono molto rumorosi, ma diventano silenziosissimi quando inseguono la preda. Quando gli scimpanzé stanno cacciando, indipendentemente dal loro numero e dall'ora del giorno, il branco si zittisce finché non è tutto finito. Questo significa, naturalmente, che gli animali che stanno cacciando non comunicano tra loro con la voce. Benché i loro movimenti siano chiaramente coordinati, non ho potuto però osservare neanche alcun gesto particolare. È interessante notare inoltre che, durante la caccia, il ruolo principale non è esclusivo di un individuo, ma che, indipendentemente dal rango sociale, ciascuno assume il ruolo piú importante secondo le circostanze.

Quando la preda è stata raggiunta, si ha la cattura vera e propria che avviene in tre stadi: l'aggressione, l'uccisione e una prima spartizione che non dura piú di 5 minuti. Quando lo scimpanzé è giunto a meno di un metro dalla preda spicca un grande balzo; se gli inseguitori sono piú di uno, essi balzano insieme sulla vittima. In questo momento il silenzio viene rotto da un altissimo grido che raggiunge gli altri scimpanzé del branco anche se si trovano a piú di due chilometri di distanza.

L'uccisione avviene generalmente in maniera assai veloce. Se la preda è stata catturata da un solo scimpanzé questo l'addenta alla nuca oppure le torce il collo. A volte lo scimpanzé afferra l'animale per le zampe e lo sbatte contro un albero o per terra. Se la preda è stata catturata da diversi scimpanzé, viene uccisa e squartata contemporaneamente perché ogni cacciatore strappa verso di sé la parte afferrata.

La prima divisione della carcassa dell'animale ucciso è un'attività che non ha nulla a che vedere con la cerimonia di spartizione che avviene piú

La maggior parte del tempo dedicato alla caccia viene in realtà occupato nel divorare la preda. In grigio è rappresentata la durata degli episodi di caccia, in colore il numero degli scimpanzé che si aggregò agli uccisori per consumare il banchetto. Il piú breve di questi durò un'ora e quaranta minuti (*e*) e vi parteciparono 5 scimpanzé. Il piú lungo durò piú di 9 ore (*h*); la preda era un colobo e i partecipanti 15. Nell'esempio *l* la preda era un'antilope, le altre 10 prede erano babbuini.

Sono prevalentemente gli scimpanzé adulti a partecipare ai banchetti in cui viene spartita la preda. È meno frequente che le femmine prendano o chiedano cibo ai maschi (*a*), mentre piú spesso questi si scambiano cibo tra loro (*b*). Gli individui giovani si avvicinano sia ai maschi adulti (*c*) che alle femmine (*d*) ma in minor numero, piú rari sono comunque gli altri tipi di interazioni tra individui non appartenenti alla stessa famiglia: tra femmine e femmine (*f*), tra femmine e giovani (*g*), e tra giovani e giovani (*h*). Un adulto non chiede mai cibo a un giovane. Nell'ambito della stessa famiglia le interazioni piú frequenti avvengono tra madre e figli (*a*). È meno frequente che siano le madri a chiedere carne ai figli (*b*) o i fratelli tra loro (*c*).

tardi. Immediatamente dopo l'uccisione, per un breve periodo di tempo, la carcassa appartiene a tutti; se altri scimpanzé che non l'hanno uccisa riescono ad afferrarne una parte, possono portarsela via senza correre il rischio di recriminazioni da parte degli uccisori. Per esempio, ho visto sei scimpanzé, di cui quattro giunti dopo l'uccisione della preda, dividersi tra loro un babbuino. Sono estremamente rari gli episodi di intolleranza durante la prima spartizione della preda; i pochi litigi a cui ho assistito non erano affatto violenti, persino i maschi di rango piú elevato non fanno valere i loro diritti in quel momento.

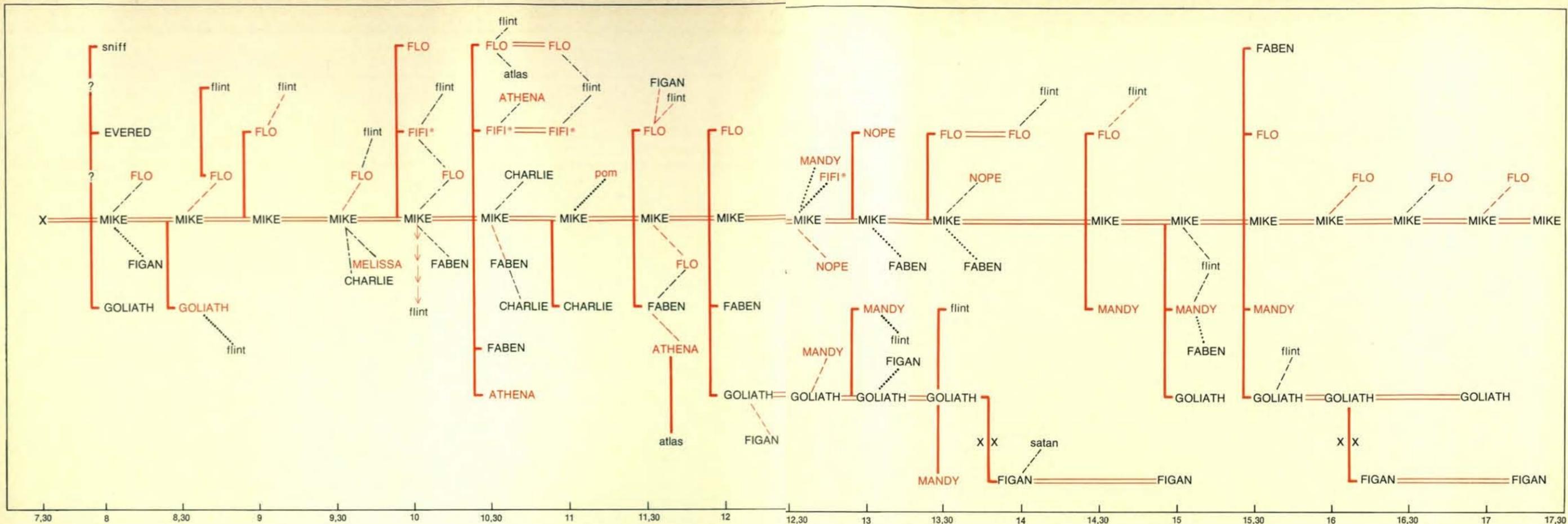
Se il cacciatore, invece, riesce a tenere per sé la preda per alcuni minuti e si allontana dal luogo dell'uccisione, questa perde il carattere di proprietà comune. Gli scimpanzé che, attirati sul luogo dell'uccisione dal grido del vincitore, vi giungono troppo tardi non possono piú appropriarsi di una parte di preda.

Se la cattura è stata compiuta da piú di uno scimpanzé, questi si spartiscono tra loro le porzioni migliori e quindi si allontanano portandosi dietro il proprio pezzo per una decina di metri; tutti gli scimpanzé che non avevano diritto di partecipare alla prima divisione si radunano intorno a ciascuno dei possessori formando un gruppetto di « questuanti ». La formazione di questi gruppetti dà inizio all'ultima, e piú importante, dal punto di vista sociale, fase della caccia: la consumazione della preda.

Gli scimpanzé di Gombe, quando si allontanano dalla zona in cui vivono, non formano dei gruppi comprendenti individui con ben determinati ruoli sociali. La composizione di queste piccole spedizioni varia di volta in volta. Per questo motivo non sono mai gli stessi individui che svolgono il ruolo di cacciatore o di questuante. È raro tuttavia che intorno a una preda uccisa ci siano meno di cinque maschi e femmine di varie età. Una volta intorno a una sola preda vidi ben 15 scimpanzé. Anche quando il loro numero è cosí elevato generalmente quasi tutti finiscono col ricevere un pezzo di carne.

Considerando il tempo necessario per consumare interamente la preda, le piccole porzioni di carne ricevute da ciascuno e l'elevato numero dei partecipanti alla cerimonia della spartizione, è logico pensare che questa non abbia una vera importanza dal punto di vista alimentare, ma piuttosto abbia un significato sociale. Innanzitutto spesso la caccia avviene dopo che gli scimpanzé si sono rimpinzati di

La gabbia toracica di un colobo che si trova nelle mani del legittimo proprietario viene ulteriormente smembrata da altri membri del branco che ne portano via dei pezzi.

Nella foto si vede uno scimpanzé che viene accontentato e ottiene dal possessore della preda un pezzo di carne. In alto a destra c'è un'altra scimmia che aspetta la sua parte.

Dopo che Mike, il capo del branco degli scimpanzé di Gombe, ebbe ucciso un colobo, si formò intorno a esso un capannello di 16 scimpanzé tra adulti e giovani. 13 di essi ricevettero alcune porzioni della preda e il banchetto durò dalle 8 del mattino alle 5 e mezzo di sera. In maiuscolo sono scritti i nomi degli adulti, in nero quelli dei maschi e in colore quelli delle femmine. Il possesso o il dono di carne sono indicati da linee colorate, una linea doppia indica il possesso di una grossa porzione di preda. Le richieste senza esito positivo sono indicate in nero. Possedendo la porzione più grande, Mike restò il centro dell'attenzione per tutta la giornata. Egli diede per due volte una grossa porzione a Goliath, un maschio anziano che se la fece portare via da Figan, un giovane maschio. La femmina che ricevette più carne da Mike fu Flo, che ottenne per ben 12 volte una porzione, in due casi di notevoli dimensioni.

grandi quantità di cibo vegetale. Inoltre a Gombe non abbiamo visto nessuno scimpanzé catturare e mangiare da solo un mammifero anche piccolo quando vi erano intorno degli altri scimpanzé adulti. Nei dieci anni della ricerca svolta a Gombe si videro solo due casi di uccisione di preda avvenuta di nascosto. I due episodi avvennero contemporaneamente: due femmine incontrarono due piccoli cinghialetti e ciascuna se ne mangiò uno. Alle uccisioni non assistettero altri adulti.

Il gruppo di scimpanzé che partecipa alla cerimonia della spartizione, non si separa fino a che la carcassa dell'animale non è stata completamente divorata: essi mangiano i peli e la pelle, le ossa, il midollo, i bulbi oculari e persino i denti. Il cervello rappresenta la parte più pregiata, infatti, benché io abbia visto distribuire agli altri membri della tribú qualunque altra parte della preda, non una sola volta in 12 mesi ho visto uno scimpanzé dare a un altro il cervello o una parte di esso. Gli scimpanzé estraggono il cervello o scavando con un dito entro il foro occipitale o rompendo coi denti le ossa della fronte e quindi aspirando la materia cerebrale fino a ripulire completamente la cavità cranica.

Gli scimpanzé di Gombe avevano la strana abitudine di mettersi in bocca delle foglie quando masticavano della carne tenera, forse per far durare più a lungo la masticazione o per fare risaltare meglio il sapore del cibo. Tutte le volte che mangiavano il cervello lo masticavano anche alcune foglie che venivano scartate dopo alcuni minuti e spesso donate a qualche altro scimpanzé del gruppo, cosicché in certo modo anche il cervello, sebbene indirettamente, veniva distribuito. Le foglie masticate venivano cedute ad altri 2 o 3 scimpanzé prima di venire definitivamente buttate via. Le foglie costituiscono l'unico « utensile » adoperato dagli scimpanzé durante tutte le varie fasi della caccia. Di solito un maschio dopo che si è mangiato il cervello della preda, utilizza ancora le foglie per assorbire e asportare la materia cerebrale e il liquido rimasti. Questa tecnica è simile a quella osservata dalla Goodall alcuni anni fa, consistente nell'utilizzare le foglie come spugne vegetali per assorbire l'acqua rimasta nelle cavità dei tronchi degli alberi.

Il cervello dell'animale ucciso può essere mangiato per primo o per ultimo. D'altro canto, quando uno scimpanzé singolo smembra la sua preda, incomincia sempre col togliere e quindi mangiare le viscere. Successivamente viene aperta e svuotata la gabbia toracica. La scimmia per compiere questa operazione usa i denti, le zampe anteriori e posteriori. Gli arti della preda vengono consumati più tardi. Quando si va a ispezionare il luogo dell'uccisione dopo che gli scimpanzé si sono allontanati non si trovano che dei minuscoli frammenti.

Gli scimpanzé che formano il gruppo di questuanti usano tre metodi per ottenere la carne. Il più semplice e che non richiede quasi un rapporto con il possessore della carne è quello di aspettare i pezzi che cadono o vengono scartati. Questo sistema è adottato dagli scimpanzé giovani o dalle femmine che preferiscono non affrontare direttamente il possessore.

Il secondo metodo consiste semplicemente nel portare via un pezzo di carne o nel mettersi tranquillamente ad addentare quella del legittimo proprietario. Questo approccio diretto viene generalmente usato dai figli nei confronti della madre. Anche i maschi tollerano questo tipo di comportamento preferibilmente da parte di un altro maschio, se si tratta di un fratello e da parte di una femmina se è sessualmente recettiva oppure se è di elevato rango sociale. Non è raro vedere due scimpanzé che tranquillamente mangiano insieme lo stesso pezzo di carne. Mi è capitato persino di vedere tre scimpanzé addentare un pezzo di preda senza che il proprietario se ne adontasse. Gli scimpanzé non ancora adulti solo raramente affrontano l'approccio diretto.

C'è poi un terzo tipo di richiesta che richiede degli specifici schemi di comportamento. La carne infatti può essere richiesta nei seguenti modi: il richiedente può avvicinarsi al possessore e guardare fissamente lui o la carne, oppure può allungare una mano e toccargli il mento o le labbra o la carne stessa. Il richiedente può accompagnare questi gesti con un breve lamento. Questo repertorio di gesti viene usato da scimpanzé di qualunque età e sesso. Il più piccolo scimpanzé da me osservato in questo atteggiamento aveva 18 mesi, il più importante, dal punto di vista sociale, era Mike il capo di tutti gli scimpanzé di Gombe.

Il rifiuto alle richieste viene dimostrato ignorando semplicemente il richiedente, voltandosi da un'altra parte, allontanando un poco la carne, spostandosi in un luogo meno accessibile respingendo decisamente il questuante e anche mediante suoni o gesti. Se la risposta è affermativa il richiedente può addentare la carne o portarne via una parte, oppure può ricevere della carne nella mano che ha teso per chiedere. Ho assistito a 395 richieste di cibo, 114 delle quali furono accolte. In qualche caso il possessore della carne ne stacca una porzione molto abbondante e la offre con la mano distesa al richiedente. Una volta vidi addirittura offrire l'intera carcassa. Una altra volta vidi il possessore della carcassa dividerla in due e offrirne metà a un maschio che aveva continuato a chiedere la carne con grande insistenza.

Quando gli scimpanzé spartiscono la carne, non mostrano alcuna competitività tra loro e sembrano generalmente rilassati. La preda viene mangiata con molta calma e senza dubbio assai gustata. Mi accadde assai raramente di vedere un atteggiamento ostile tra gli scimpanzé che avevano la carne e quelli che non l'avevano. Gli individui che hanno atteso invano a lungo possono a volte prendersela con gli altri richie-

La fotografia mostra un giovane scimpanzé che tocca il muso della propria madre per farle capire che desidera un pezzo della foglia che essa sta masticando.

denti, ma non tentano mai alcun gesto minaccioso verso il proprietario della carne.

Il rango sociale elevato sembra non sia assolutamente una garanzia di successo tra i richiedenti. Anche se chi ha la carne è uno scimpanzé di basso rango, chi gli chiede la carne deve farlo con lo stesso repertorio di gesti e non può imporsi aggressivamente anche se il suo rango sociale è superiore. Mi è capitato di vedere il capo Mike chiedere carne per sette ore a un maschio subordinato e non ricevere niente in cambio. Due volte in un anno ho visto portar via la carne al suo possessore con una manovra di sorpresa che avrebbe potuto provocare una reazione ostile; quest'ultimo si limitò invece a insultare verbalmente e a fare gesti minacciosi. Non una sola volta nelle 43 ore in cui osservai la spartizione della preda vidi due scimpanzé lottare tra loro per il possesso della carne.

Fino a che punto le osservazioni eseguite a Gombe e altre similari possono modificare le teorie attuali che riguardano l'evoluzione dell'uomo? Molte delle ipotesi sull'evoluzione del comportamento e dell'organizzazione sociale umana si basano essenzialmente sulla caccia come base dell'alimentazione dell'uomo. È stato per esempio suggerito, che l'evoluzione della stazione eretta permise ai primi ominidi di avere le mani libere per scagliare oggetti, portare armi e facilitare la corsa nella savana. Questa acquisizione è stata considerata il punto cruciale nell'evoluzione umana: il momento in cui la « scimmia-uomo » spostò il suo ambiente di vita dalle foreste dell'Africa alle praterie. Quando questo cambiamento ebbe luogo gli ominidi avrebbero anche raggiunto l'abilità manuale e l'organizzazione sociale comprendente anche la divisione dei compiti e del cibo, che permise loro di formare dei nuclei familiari e di sopravvivere come cacciatori e raccoglitori nomadi.

Io ritengo che vari primati diventarono capaci di cacciare molto prima dell'avvento della « scimmia-uomo ». Molte specie di primati dimostrano di aver sviluppato numerosi adattamenti nel corso della loro evoluzione durata alcuni milioni di anni. Tra questi adattamenti non potrebbe esservi anche l'abitudine di cacciare mammiferi e in particolare altri primati? Per un primate omnivoro che si può muovere liberamente in un ambiente tridimensionale, gli altri primati costituiscono probabilmente una delle prede più accessibili. Vediamo se è possibile dimostrare questa asserzione.

La maggior parte dei mammiferi che vengono uccisi dagli scimpanzé di Gombe sono anch'essi primati. Si sa che anche gli scimpanzé della Tanzania e dell'Uganda cacciano altre scimmie. È noto che in diverse altre regioni dell'Africa i babbuini uccidono alcuni primati. Riferendoci al passato, i resti fossili dell'*Australopithecus* rinvenuti in Sud Africa sono sempre associati a crani evidentemente spezzati di babbuini. È quindi probabile che l'*Australopithecus* cacciasse i primati che vivevano nel suo habitat.

Supponiamo che la caccia, la collaborazione tra vari individui per catturare la preda e la spartizione di essa siano sorte tra i primati molto prima dell'apparizione degli ominidi; se questa ipotesi fosse verificata metterebbe in dubbio numerose teorie sull'evoluzione dell'uomo. Per esempio perderebbe importanza il fatto che la stazione eretta abbia permesso di avere le mani libere per scagliare i primi tipi di armi e sia uno dei requisiti indispensabili per l'acquisizione della capacità di cacciare. Lo stesso avverrebbe per la teoria che vede nell'ambiente aperto della savana, la condizione ideale per imparare a cacciare. Inoltre anche se la caccia non fosse un'acquisizione dei primati assai più antica di quello che si è finora ritenuto, almeno una delle ipotesi sopra descritte dovrebbe comunque essere abbandonata. Infatti come dimostrano le osservazioni fatte sugli scimpanzé di Gombe, l'organizzazione sociale che permette la caccia in gruppo presso i primati, non è certo esclusiva dell'uomo.

Riassumendo, gli scimpanzé di Gombe rappresentano una popolazione di omnivori predatori che completano la loro dieta prevalentemente vegetariana in varie maniere tra cui la caccia di altri mammiferi, e in particolare di primati. Il fatto che la carne sia un cibo non indispensabile, significa che gli scimpanzé non sono dei comuni omnivori che si limitano a divorare di quando in quando una preda che hanno la ventura di incontrare. Allo stesso tempo gli scimpanzé di Gombe non sono legati alla dieta strettamente carnivora tipica della maggior parte dei predatori.

L'interesse del comportamento di caccia degli scimpanzé di Gombe non riguarda in ogni caso il fatto dietetico, quanto la loro caratteristica cooperazione nel cacciare e la spartizione finale del cibo. Più apprendiamo riguardo al comportamento dei primati e più piccole diventano le differenze tra i primati umani e quelli non umani. Le osservazioni fatte a Gombe rafforzano questa conclusione.

TECNOLOGIA FOTOGRAFICA

Un'avanzata attrezzatura Polaroid per fotodocumentazione immediata viene presentata in questi giorni agli ambienti tecnico-scientifici nazionali

di Giuseppe Mojana

Una nuova era nella registrazione fotografica di laboratorio si è aperta con l'apparizione della rivoluzionaria apparecchiatura Polaroid MP-4, che consente di risolvere all'istante tutti quei problemi di natura fotografica che possono presentarsi nei laboratori, ogni giorno, in ogni momento.

Micro, macrofotografie, diapositive e stampe di diversi formati, ottenute con i tredici materiali sensibili Polaroid attualmente a disposizione, costituiscono le possibilità pressoché illimitate di questo nuovo frutto dei laboratori Polaroid. L'apparecchiatura MP-4, a parte le sue due caratteristiche fondamentali di semplicità d'uso e d'immediatezza di risultato, offre una completa versatilità operativa, ingombro minimo ed un costo estremamente competitivo.

Il valore del tempo

La camera oscura è stata eliminata: ogni ripresa può essere effettuata in luce ambiente e, se insoddisfacente, ripetuta subito, con il soggetto nelle medesime condizioni di ripresa. Qualitativamente, le pellicole Polaroid risultano ineccepibili sia per riprese in bianconero, che offrono una notevole gamma di grigi, sia per quelle a colori, che vantano una rispondenza cromatica di primo ordine.

Il mondo dell'infinitesimale, il microcosmo, si offre così alle esplorazioni fotografiche immediatamente visionabili; la macrofotografia con l'apparecchio Polaroid MP-4 consente ingrandimenti di 14,8.

L'attrezzatura è di tipo modulare, pronta ad adattarsi ad ogni necessità di ripresa, ad ogni soggetto, anche il più ostico. L'intercambiabilità dei dorsi-pellicola, degli obiettivi e degli accessori permette all'operatore, anche il più inesperto di problemi fotografici, di sfruttare egregiamente i tredici differenti materiali Polaroid, compresa la ben nota pellicola tipo 55 P/N, che presenta il negativo recuperabile, al contrario di tutti gli altri materiali a sviluppo immediato.

Tutto avviene in modo talmente semplice e rapido da fare ritenere antiquata ogni soluzione di altro tipo. Tuttavia, dietro all'estrema semplicità d'uso ed all'immediatezza del risultato ci sono decine di anni di ricerca e di tecnologia fotografica nei laboratori americani della famosa società, il cui presidente, dott. Edwin H. Land, fu l'inventore del processo fotografico istantaneo. Ancora oggi Land guida le migliaia di ricercatori della Polaroid Corporation.

Applicazioni nazionali

Presentata in anteprima ad un pubblico altamente qualificato nel corso di cinque incontri recentemente svoltisi in Italia, questa novità per riprese immediate tecnico-scientifiche non ha mancato di interessare i diversi settori in cui è particolarmente necessaria la documentazione fotografica pronta all'istante.

A partire dal prossimo aprile, la Polaroid (Italia), con sede a Milano in V.le Certosa 222, pone i propri specialisti a disposizione degli ambienti scientifici ed industriali. Si potranno richiedere, oltre ad informazioni particolareggiate, anche vere e proprie prove pratiche dell'attrezzatura presso la sede desiderata. Ciò senza alcun impegno. Il personale di dimostrazione della società potrà mostrare le svariate applicazioni di questo avveniristico mezzo fotografico e riprendere ogni tipo di soggetto che verrà presentato per ripresa.

È sufficiente una richiesta, scritta o telefonica (02-30.83.941) alla Direzione Prodotti Scientifici della Polaroid (Italia).

La composizione modulare dell'attrezzatura fotografica Polaroid MP-4 è chiaramente esposta in questa illustrazione.

La sequenza mostra il controllo immediato della ripresa in anatomo-patologia. Inquadrata l'aorta da riprendere, basta scattare e, dopo pochi secondi, verificare l'immagine ottenuta con l'oggetto della ripresa. L'ospedale è quello di Busto Arsizio.

I tubercoli ottici

Le cellule di queste piccole eminenze del mesencefalo dei mammiferi sembra che aiutino l'occhio a scoprire e seguire oggetti in movimento. Hanno la stessa funzione anche nel caso di stimoli acustici e tattili

di Barbara Gordon

Per sopravvivere, un animale deve essere in grado di reagire rapidamente non appena degli oggetti in movimento entrano nel suo campo visivo. L'animale deve determinare prontamente l'origine dello stimolo visivo, la velocità e la direzione del suo movimento. Quindi l'animale deve muovere la testa e gli occhi per mantenere nel campo visivo il punto di origine dello stimolo. Allo stesso modo, un animale deve muovere la testa e gli occhi per cercare l'origine di un rumore in movimento o di un oggetto che sfiora il suo corpo. Si potrebbe quindi pensare che se si fosse in grado di identificare la regione del cervello responsabile del controllo della posizione della testa e degli occhi, si scoprirebbe che essa risponde a diversi tipi di stimoli: visivi, acustici e somatici.

Si vanno accumulando rapidamente prove secondo le quali una zona del cervello dei mammiferi strettamente connessa con il controllo dei movimenti della testa e degli occhi è costituita da due protuberanze poste sulla superficie dorsale del mesencefalo chiamate dagli anatomisti tubercoli quadrigemini superiori o tubercoli ottici. Con l'impiego di microelettrodi in grado di registrare la risposta di singole cellule di queste regioni a vari stimoli si è trovato che queste strutture nervose ricevono effettivamente informazioni sensoriali dai sistemi visivo, uditivo e somatico. Nei vertebrati inferiori, i tubercoli ottici hanno la funzione di centro visivo principale. Nei vertebrati superiori, l'elaborazione dell'informazione visiva è stata assunta, in gran parte, dall'area visiva della corteccia cerebrale. Tuttavia, i tubercoli superiori continuano a ricevere impulsi nervosi direttamente dal nervo ottico insieme a impulsi provenienti dalla corteccia visiva. Inoltre gli strati piú profondi ricevono impulsi nervosi dai sistemi uditivo e somatico. Esperimenti recenti suggeriscono che gli strati piú profondi dei tubercoli ottici possono contenere mappe sovrapposte dei campi visivo uditivo e somatico. Sebbene queste mappe sovrapposte siano piuttosto semplici, esse possono permettere a un animale di rispondere rapidamente ed efficacemente alla minima variazione degli stimoli offerti da un complesso ambiente tridimensionale.

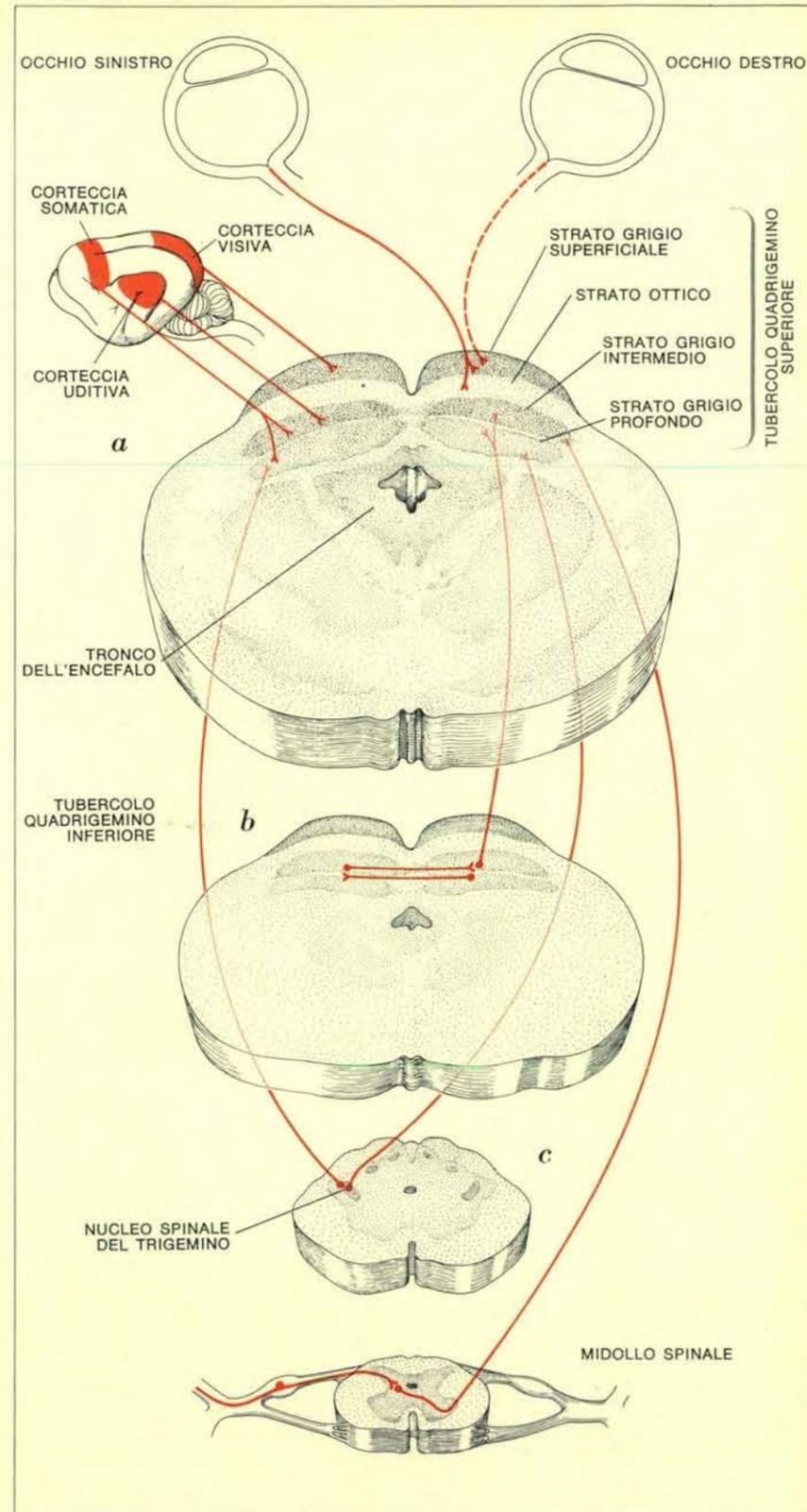
I tubercoli quadrigemini superiori sono un terminale ricevente degli impulsi nervosi provenienti dall'occhio, dalla corteccia visiva, dalla corteccia uditiva, dal midollo spinale, dal tronco dell'encefalo e dalla corteccia somatica. Il disegno rappresenta un cervello di gatto visto di lato. Le principali vie nervose sono mostrate distinte nelle sezioni *a*, *b*, *c* (oltre a una sezione del midollo spinale) nell'illustrazione nella pagina a fronte.

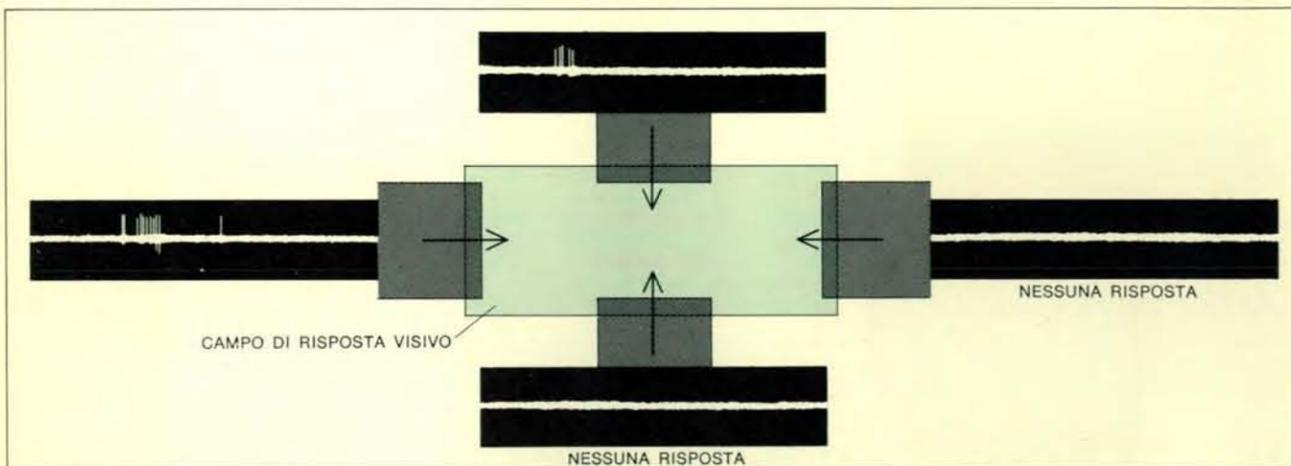
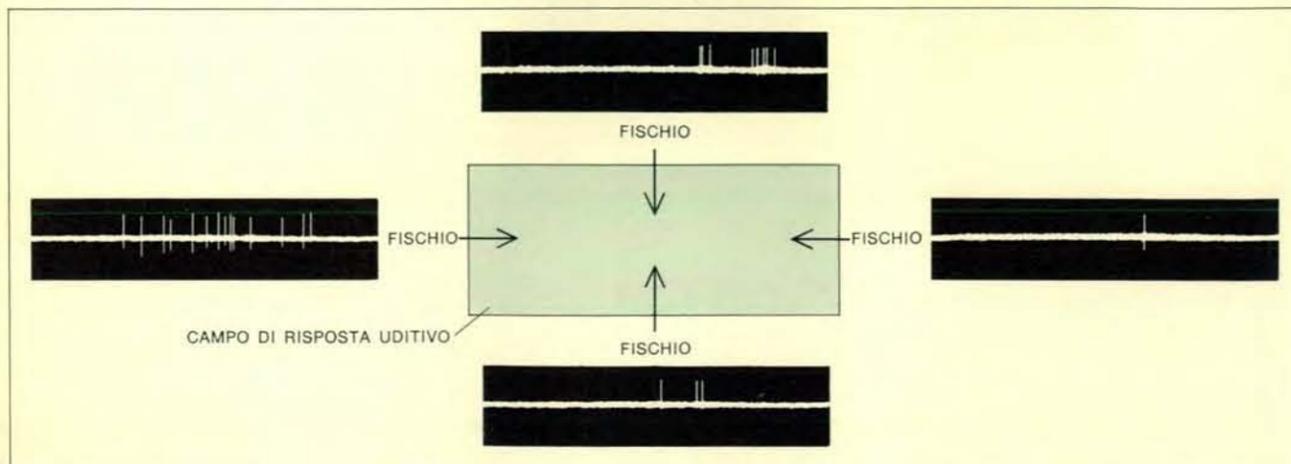
In ogni sistema sensoriale l'elaborazione dell'informazione proveniente dal mondo esterno ha inizio quando un segnale elettrico è generato da uno stimolo adeguato in un recettore idoneo. Cosí la luce attiva il sistema visivo, il suono il sistema uditivo e il contatto o movimenti simili il sistema somatico. Questo segnale elettrico iniziale è piú graduato, vale a dire piú intenso è lo stimolo, maggiore è il segnale. Se il segnale elettrico generato nel recettore ha dimensioni sufficienti, esso dà origine a un potenziale d'azione, o impulso nervoso, in una cellula nervosa. I potenziali d'azione sono i segnali che vengono trasmessi lungo l'assone, la fibra della cellula nervosa. Talvolta, un potenziale d'azione viene prodotto nella stessa cellula in cui si ha la risposta iniziale graduata allo stimolo. Talvolta, il segnale viene trasmesso attraverso parecchie cellule prima di giungere alla cellula in cui può generare un potenziale d'azione. Tutti i potenziali d'azione che viaggiano lungo un assone sono del tutto simili per forma e intensità. Quindi tutte le informazioni riguardanti lo stimolo dipendono dal tipo di cellule eccitate e dal modo in cui si eccitano.

La maggior parte della complessa elaborazione dell'informazione sensoriale non ha luogo all'interno dell'organo di senso, ma nel cervello o nel midollo spinale. L'informazione sensoriale è portata dall'organo di senso al cervello dai potenziali d'azione che viaggiano lungo gli assoni. Il terminale di ogni assone è in contatto con altre cellule nervose nel cervello mediante giunzioni dette sinapsi. Nella maggior parte delle sinapsi l'arrivo di un potenziale d'azione permette la liberazione di una piccola quantità di mediatore chimico. La sostanza mediatrice si muove attraverso la cima sinaptica fino alla superficie esterna della membrana della cellula vicina: la cellula « postsinaptica ». L'effetto di questa sostanza chimica sulla cellula postsinaptica può essere sia eccitatorio che inibitorio, può cioè sia aumentare che diminuire la probabilità che la cellula postsinaptica generi un potenziale di azione.

Le informazioni provenienti da ciascun tipo di organo di senso vengono elaborate lungo vie sensoriali distinte. Una via sensoriale è costituita da organi di senso periferici e da parecchi gruppi di cellule nervose detti nuclei. L'informazione sensoriale viene elaborata in vari stadi, cosí che ogni nucleo riceve una informazione da quello che lo precede, la elabora e la invia al successivo.

Ogni via sensoriale principale termina in una area specifica della corteccia cerebrale detta area di risposta sensoriale principale. Per la maggior parte dei sistemi sensoriali abbiamo una notevole conoscenza sul modo in cui le proprietà dello stimolo sono codificate dalle singole cellule lungo la via che va dall'organo di senso alla corteccia. (Il sistema uditivo è meno conosciuto del visivo e del somatico). Tuttavia, poco si sa del modo in cui gli stimoli provenienti dalle aree di risposta principali della corteccia sono utilizzati dal resto del cervello. Il sistema visivo costituisce, in una certa misura, una eccezione: il funzionamento di due aree visive oltre alla corteccia visiva principale è piuttosto noto.

Poiché ogni cellula lungo una via sensoriale può ricevere stimoli eccitatori e inibitori da un gran numero di recettori sensoriali e da un gran numero di altre cellule nervose, può essere piuttosto complicato stabilire esattamente quale è la stimolazione richiesta per una cellula. Per esempio, l'informazione visiva proveniente dai recettori viene elaborata in un modo piutto-

I diversi stimoli sensoriali convergono nei tubercoli quadrigemini superiori che sono rappresentati nella sezione (*a*). Per semplicità sono state raffigurate soltanto alcune delle vie nervose controlaterali che partono dall'occhio e dal midollo spinale. Le proiezioni nervose del complesso spinale del trigemino (*c*), tuttavia, sono bilaterali. La proiezione retinica va principalmente allo strato grigio superficiale e allo strato ottico superficiale dei tubercoli superiori. Una proiezione secondaria dell'occhio ipsolaterale è rappresentata da una linea tratteggiata. Le proiezioni nervose della corteccia uditiva e dei tubercoli quadrigemini inferiori (che fanno parte del sistema uditivo) terminano negli strati intermedio e profondo dello strato grigio, come pure le proiezioni della corteccia somatica, dei nuclei somatici, del tronco dell'encefalo e del midollo spinale.

Studi sulla corteccia visiva del gatto hanno condotto alla sorprendente scoperta che la maggior parte delle cellule complesse in quella parte del cervello rispondono soltanto a campi visivi specifici e soltanto a stimoli specifici che entrano in quei campi. Hubel e Wiesel della Harvard Medical School hanno trovato, per esempio, che certe cellule corticali complesse reagiscono a una linea orizzontale che viene fatta muovere lentamente su e giú nel campo di risposta visivo della cellula (*quadro colorato*), ma non rispondono affatto alla stessa linea mossa orizzontalmente. Altre cellule rispondono ad altre forme, direzioni e movimenti. L'autore ha esteso tali studi ai tubercoli quadrigemini superiori (*si vedano le illustrazioni seguenti*).

La risposta di una cellula che si trova nello strato grigio intermedio dei tubercoli quadrigemini superiori è diversa da quella di una cellula complessa tipica della corteccia visiva. La cellula risponde intensamente quando una figura scura viene fatta muovere nel campo di risposta visivo della cellula (*rettangolo colorato*) da sinistra, risponde in modo minore quando la stessa figura entra nel campo dall'alto e non dà alcuna risposta quando questa entra da destra oppure dal basso. Il campo di risposta visivo ha un'ampiezza di 10 gradi e un'altezza di quattro gradi; la figura in movimento ha un'ampiezza di tre gradi.

Le cellule dei tubercoli quadrigemini la cui risposta agli stimoli visivi è illustrata sopra, mostrano una risposta uditiva. Lo stimolo è il fischio emesso da un tubo che viene mosso attraverso il campo uditivo nella direzione indicata dalle frecce.

sto complesso prima di lasciare la retina. Le cellule del ganglio retinico, le cellule che inviano i loro assoni dall'occhio al cervello, costituiscono la tappa finale di questa elaborazione. Queste cellule ricevono il loro stimolo visivo, attraverso parecchi strati di cellule retiniche, da un gran numero di recettori visivi. Le cellule del ganglio retinico possono essere influenzate dalla luce in una piccola regione della retina, pressoché circolare. Questa regione è nota come campo recettivo cellulare. Il campo recettivo è costituito da due regioni: una regione centrale circolare e un contorno concentrico. L'eccitazione della cellula aumenta quando la luce colpisce la regione centrale e diminuisce quando la luce colpisce il contorno e viceversa.

Quando l'informazione visiva ha raggiunto la corteccia visiva, ogni cellula richiede una stimolazione piú complessa. Per esempio, molte cellule della corteccia visiva si eccitano solo quando i loro campi di risposta sono stimolati da fasce chiare o scure o da contorni con orientamento, ampiezza e lunghezza specifici. Allo stesso modo, il sistema uditivo comprende cellule che percepiscono un suono solo se questo cade in una certa banda di frequenza e si trova in una certa regione del campo uditivo. Le cellule del sistema somatico rispondono generalmente a un solo tipo di stimolo (contatto, movimento di peli o di articolazioni) in una regione del corpo.

In conclusione, la maggior parte delle cellule che costituiscono una via sensoriale principale rispondono soltanto a stimoli che hanno delle caratteristiche ben precise. Queste cellule sono fatte in modo da determinare esattamente la qualità, le dimensioni e l'ampiezza dello stimolo. Le cellule che richiedono uno stimolo ben definito non sono, tuttavia, in grado di aiutare un animale a orientarsi verso uno stimolo molto debole in modo da determinarne meglio la natura esatta. Questo compito può essere svolto in gran parte dai tubercoli quadrigemini superiori. Questi non solo ricevono una grande quantità di precise informazioni sensoriali, ma ricevono anche ogni genere di informazioni da almeno due vie diverse: dalle cellule che fanno parte della via che porta alla corteccia e dalle regioni sensoriali della corteccia. Lo stimolo visivo raggiunge i tubercoli ottici direttamente dalle cellule del ganglio retinico e dalla corteccia visiva. Gli stimoli uditivi hanno origine sia nei tubercoli che nella corteccia uditiva. L'informazione somatica giunge ai tubercoli ottici direttamente dal midollo spinale, dai nuclei della colonna dorsale e dalla corteccia somatica (*si veda l'illustrazione a pagina 71*).

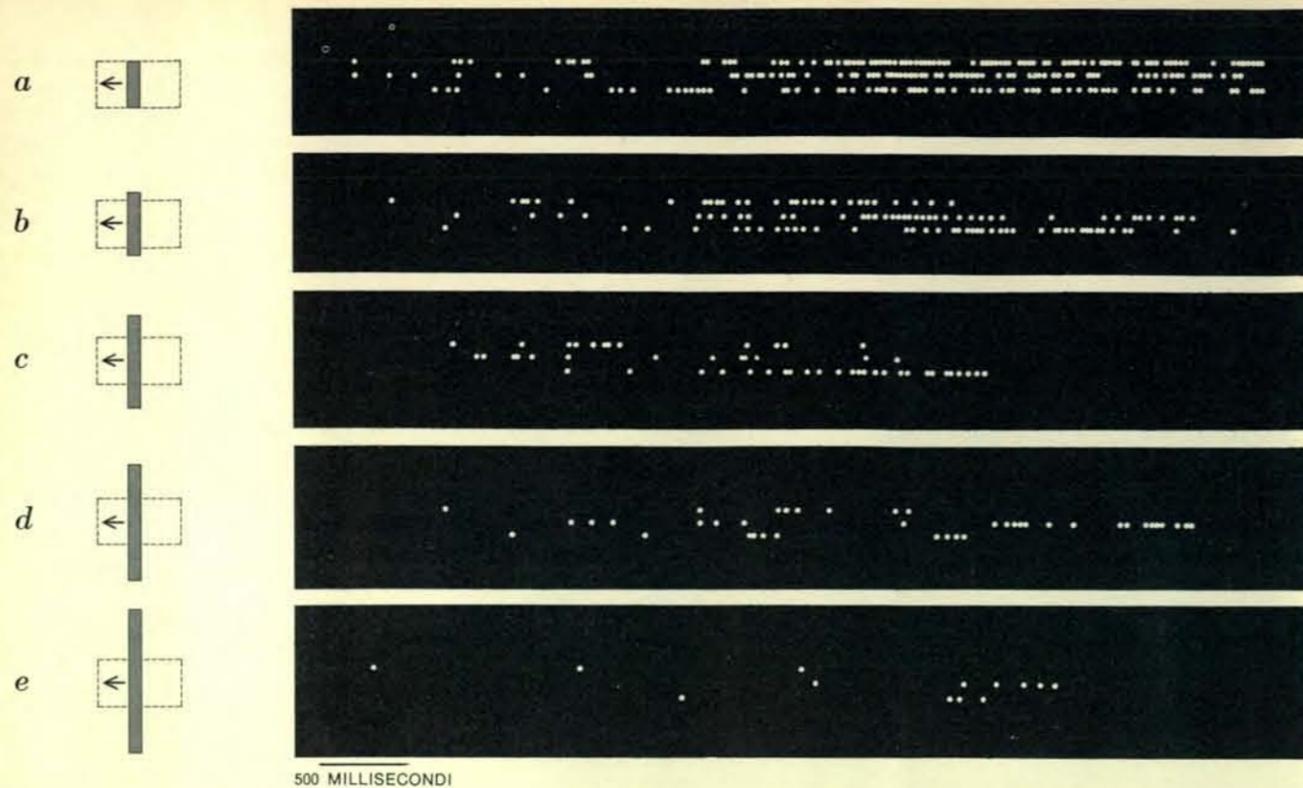
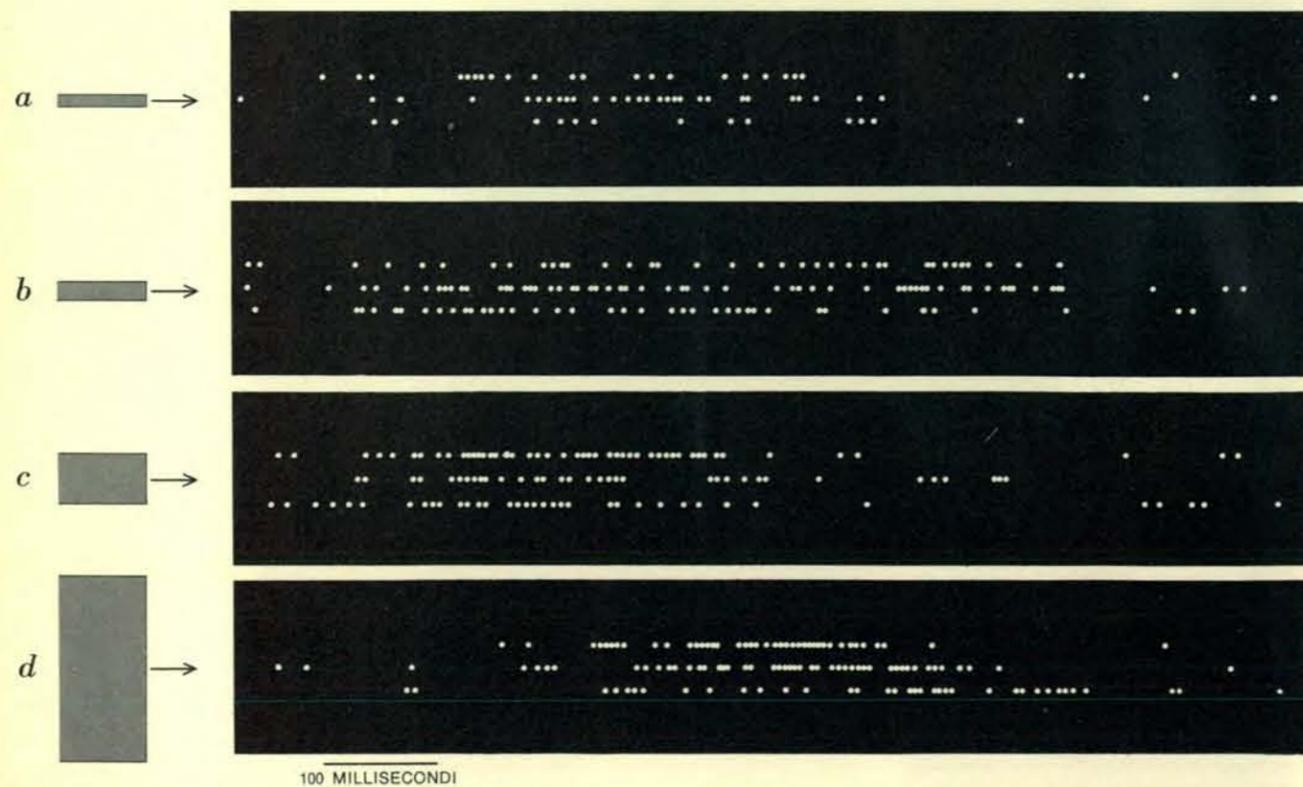
È noto da tempo che l'informazione visiva ricevuta dai tubercoli ottici è organizzata topograficamente. Ciascun tubercolo ottico riceve informazioni dal campo visivo controlaterale. In altre parole, il tubercolo sinistro controlla il campo visivo destro (vale a dire l'intero campo visivo alla destra di un punto fisso) e il tubercolo destro il campo visivo di sinistra. Le proiezioni dalla retina e dalla corteccia verso i tubercoli ottici sono organizzate in modo preciso. Ogni zona dei tubercoli quadrigemini superiori riceve stimoli da cellule retiniche e da cellule corticali che sono sensibili alla stessa zona del campo visivo. Le cellule della parte anteriore dei tubercoli ottici hanno campi di risposta vicini al punto fisso; le cellule della parte posteriore hanno campi di risposta nelle regioni periferiche della retina. Le cellule delle zone piú prossime alla linea mediana del cervello hanno campi di risposta nella zona superiore del campo visivo e le cellule piú vicine alla parte esterna del cervello hanno campi di risposta nella porzione inferiore del campo visivo. Recenti esperimenti eseguiti nel mio laboratorio all'Università dell'Oregon hanno dimostrato che gli stimoli uditivi e somatici diretti ai tubercoli ottici sono organizzati topograficamente, sebbene la topografia non sia precisa per questi stimoli come lo è nel caso dello stimolo visivo.

Numerosi e diversi tipi di esperimenti sono stati fatti nel tentativo di capire come i tubercoli ottici del gatto e dei primati elaborino l'informazione sensoriale e che tipi di informazione essi forniscano al resto del cervello (esperimenti su altre specie animali non verranno qui descritti). Sebbene la maggior parte di questi esperimenti sia stata concentrata sull'elaborazione dell'informazione visiva, essi hanno anche fornito alcune nozioni sul modo in cui i tubercoli ottici utilizzano l'informazione uditiva e somatica.

Forse il metodo piú antico usato è il metodo della lesione. I tubercoli ottici possono essere eliminati dal cervello di un animale da esperimento asportandoli chirurgicamente o facendoli attraversare da corrente elettrica di notevole intensità. Dopo aver provocato una siffatta lesione, si possono paragonare le risposte di animali normali e di animali lesi a un gran numero di stimoli diversi. I risultati di questi esperimenti sono difficili da interpretare nei dettagli per diverse ragioni. Prima di tutto, è difficile produrre esattamente la stessa lesione due volte. In secondo luogo, una lesione che asporta i tubercoli quadrigemini superiori spesso si estende a regioni circostanti, mentre lesioni che sono strettamente circoscritte ai tubercoli spesso non riescono ad asportare l'intera struttura. In terzo luogo, il fatto che un particolare tipo di comportamento permanga dopo una lesione non significa che esso non abbia influenza su quel comportamento. Nonostante ciò, dagli studi sulle lesioni sono emersi alcuni dati precisi.

Tauba Pasik, Pedro Pasik e Morris B. Bender della Mount Sinai School of Medicine hanno dimostrato che rimuovendo i tubercoli ottici sia da un solo lato del cervello che da entrambi non si eliminano i movimenti dell'occhio. Sebbene gli animali mostrassero alcune deficienze nel movimento dell'occhio subito dopo la lesione, un mese dopo tutti gli animali potevano ruotare gli occhi in tutte le direzioni e presentavano i normali movimenti riflessi dell'occhio in risposta a un particolare tipo di stimolazione del canale uditivo (irrigando il canale con acqua fredda o calda). Apparentemente si ottenevano movimenti normali dell'occhio anche quando gli animali venivano posti in un cilindro rotante coll'interno dipinto a strisce bianche e nere.

James M. Sprague e Thomas H. Meikle jr. della Facoltà di medicina dell'Università della Pennsylvania hanno studiato ampiamente gli effetti delle lesioni dei tubercoli quadrigemini superiori nei gatti. Essi hanno trovato che subito dopo che era stata prodotta una lesione unilaterale, gli animali erano del tutto incapaci di seguire gli oggetti che si spostavano nel campo visivo controlaterale rispetto al tubercolo lesionato sebbene potessero muovere gli occhi in tutte le direzioni. (Si deve ricordare che ciascun tubercolo riceve informazioni visive solo dal campo visivo controlaterale.)

Un mese dopo gli animali rispondevano a stimoli visivi nel campo controlaterale se gli stimoli cadevano entro un angolo di 60 gradi dalla linea mediana. Gli animali rispondevano raramente agli stimoli che si presentavano oltre i 60 gradi nel campo visivo controlaterale. Subito dopo che era stata provocata la lesione gli animali non riuscivano a orientarsi in modo adeguato a rumori nel campo uditivo controlaterale e il padiglione dell'orecchio controlaterale rispetto alla lesione non si muoveva in risposta al rumore. Sebbene le risposte di orientamento verso stimoli uditivi migliorassero nel tempo non ritornavano mai del tutto normali. Per il primo mese dopo che era stata provoca-

Aumentando l'entità dello stimolo, in questo caso una fessura di luce in movimento contro un fondo scuro, si evoca una risposta sempre piú piccola da parte di una cellula situata sulla superficie di un tubercolo quadrigemino superiore. L'autore ha trovato che la risposta massima si ha quando la fessura ha esattamente la stessa ampiezza del campo di risposta visivo (*a*). Quando la fessura è piú lunga, essa invade la regione repressiva del campo di risposta che di conseguenza diminuisce.

La risposta di cellule situate nelle regioni piú profonde dei tubercoli quadrigemini superiori non viene repressa quando l'entità dello stimolo aumenta. La cellula profonda ha anche un campo di risposta visivo molto piú grande della cellula la cui risposta è mostrata nell'illustrazione in alto di questa pagina. Questa cellula risponde a qualsiasi stimolo in movimento in tutto il campo visivo controlaterale a cominciare da una regione che è di 11 gradi controlaterale rispetto al centro della visione. Questo non è un dato di valore generale; piú della metà delle cellule degli strati piú profondi hanno regioni repressive.

ta la lesione, gli animali erano incapaci di localizzare gli stimoli somatici provenienti dalle regioni controlaterali del corpo.

Le lesioni bilaterali dei tubercoli, come pure quelle unilaterali, non eliminavano il movimento dell'occhio. Anche subito dopo che erano state prodotte le lesioni, gli animali presentavano movimenti dell'occhio praticamente normali in risposta alla rotazione del corpo. Gli animali, tuttavia, erano incapaci di localizzare visivamente piccoli oggetti fermi o di seguirli. Essi avevano anche qualche difficoltà nell'elevare lo sguardo al di sopra dell'orizzonte. Sebbene la capacità dell'animale di localizzare oggetti nello spazio aumentasse notevolmente durante il secondo mese successivo alla lesione, esso non ritornava mai del tutto normale. Questi esperimenti suggeriscono che la capacità che il gatto ha di muovere gli occhi non dipende da un tubercolo superiore intatto, ma che esso contribuisce alla capacità dell'animale di utilizzare la testa e i movimenti degli occhi per localizzare accuratamente gli stimoli sensoriali e di seguirli.

Questa interpretazione generale è sostenuta da alcuni esperimenti piuttosto recenti eseguiti al National Institute of Mental Health da Robert H. Wurtz e Michael E. Goldberg. Essi hanno insegnato ad alcune scimmie un esercizio consistente nello spostare lo sguardo da un obiettivo visivo a un altro. Le scimmie venivano inizialmente abituate a fissare una piccola luce. Quando la luce si spegneva e si accendeva una seconda luce, le scimmie imparavano a spostare il loro sguardo per fissarlo sul secondo obiettivo. Wurtz e Goldberg provocavano allora una lesione nelle regioni dei tubercoli ottici che contenevano le cellule che rispondevano al secondo stimolo luminoso. Dopo che era stata prodotta la lesione, gli animali erano ancora in grado di muovere gli occhi verso il secondo obiettivo, ma i movimenti richiedevano da 150 a 300 millisecondi in piú di quanto era necessario prima della lesione. Questa deficienza, cosí come altre deficienze successive a lesioni dei tubercoli ottici, andava diminuendo entro un periodo di parecchie settimane. Sebbene le scimmie, a differenza dei gatti, non perdessero la capacità di orientarsi rispetto a stimoli visivi dopo che erano state prodotte lesioni ai tubercoli ottici, esse non potevano far ciò con la stessa efficienza di prima dell'operazione. Gli esperimenti sulle lesioni dei tubercoli quadrigemini nei gatti e nelle scimmie non sono del tutto paragonabili perché Sprague e Meikle rimuovevano completamente i tubercoli dei gatti in esame, mentre Wurtz e Goldberg provocavano lesioni estese, ma incomplete.

Se i tubercoli superiori permettono a un animale di cambiare il suo punto di fissazione e di rispondere a stimoli visivi, ci si dovrebbe aspettare che le lesioni dei tubercoli alterassero l'efficienza di un'attività di discriminazione delle forme nel caso che questa richiedesse frequenti cambiamenti nel punto di fissazione. Sprague e i suoi colleghi hanno dimostrato che avviene proprio cosí in un'altra serie di esperimenti sui gatti. Essi hanno trovato che le lesioni dei tubercoli ottici non alteravano la capacità di un gatto di discriminare tra due forme se aveva imparato a farlo prima della lesione, ma esse alteravano notevolmente le capacità dell'animale di apprendere nuove attività discriminative anche se erano dello stesso genere. Forse lo svolgimento di una attività precedentemente appresa richiede soltanto un unico spostamento del punto di fissazione. L'animale sa già come si presenta lo stimolo giusto. Se il primo stimolo che esso osserva non è quello giusto, deve soltanto spostare lo sguardo nella direzione adatta. Quando l'animale sta apprendendo un nuovo tipo di discriminazione può dover spostare il suo sguardo da uno stimolo all'altro molte volte al fine di determinare quali caratteristiche distinguono lo stimolo giusto da quello sbagliato. Sembra che le lesioni dei tubercoli ottici rendano quest'ultima attività molto difficile.

La seconda tecnica usata per chiarire il ruolo dei tubercoli ottici nel controllo del movimento dell'occhio è la stimolazione elettrica. Se si inseriscono degli elettrodi nei tubercoli e si fanno passare attraverso di essi piccole quantità di corrente elettrica, in un gran numero di cellule poste in prossimità dell'elettrodo saranno evocati potenziali d'azione. (La quantità di corrente deve essere mantenuta bassa in modo da non produrre lesioni.) La stimolazione elettrica fa in modo che numerose cellule si eccitino contemporaneamente, mentre in risposta a stimoli sensoriali naturali le cellule probabilmente vengono eccitate con sequenze precisamente determinate. Nonostante il quadro normale di eccitazione che deve risultare dalla stimolazione elettrica, i movimenti dell'occhio in qualsiasi direzione stabilita possono essere evocati mediante stimolazione di un'appropriata regione dei tubercoli. Peter H. Schiller dell'Istituto di Tecnologia del Massachusetts, ha trovato che la corrente necessaria per provocare i movimenti dell'occhio stimolando tubercoli quadrigemini superiori è compresa tra un terzo e un decimo della corrente necessaria per produrre i movimenti dell'occhio stimolando la corteccia visiva o i campi frontali dell'occhio (una zona centrale posta piú avanti che è probabilmente implicata nel controllo dei movimenti dell'occhio). Questa osservazione suggerisce, ma non prova, che i tubercoli quadrigemini sono piú direttamente implicati nei movimenti degli occhi di quanto non lo siano la corteccia visiva o i campi frontali dell'occhio.

Schiller e David A. Robinson della Johns Hopkins School of Medicine hanno osservato, indipendentemente, che la misura e la direzione dei movimenti dell'occhio prodotti dalla stimolazione elettrica dei tubercoli dipendevano dalla posizione esatta degli elettrodi stimolatori. L'occhio si muoveva verso la posizione del campo visivo che corrisponde alla parte stimolata. Per esempio, la stimolazione della parte mediana di ciascun tubercolo provoca movimenti dell'occhio verso l'alto, e piú la stimolazione è verso la parte mediana, maggiore è la componente verso l'alto del movimento dell'occhio. Aumentando la durata dello stimolo, non si aumenta l'estensione del movimento dell'occhio, ma si produce una serie di movimenti avente ciascuno lo stesso ordine di grandezza e la stessa direzione degli altri. I movimenti degli occhi risultanti dalla stimolazione dei tubercoli erano indipendenti dalla posizione iniziale.

Questo risultato dimostra che i tubercoli ottici regolano piuttosto il movimento dell'occhio che la sua posizione. Probabilmente, l'attività delle cellule di una determinata regione indica la posizione dello stimolo in rapporto al normale centro dello sguardo dell'animale e non in rapporto al centro della testa. Per esempio, se un animale vuole cambiare il suo punto di fissazione, per osservare un oggetto che compare improvvisamente nel campo visivo in una posizione 20 gradi al di sopra e 10 gradi a destra del normale punto di fissazione, esso dovrà fare un movimento degli occhi con una componente verticale di 20 gradi verso l'alto e una componente orizzontale di 10 gradi verso destra. Naturalmente, l'entità e la direzione del movimento dell'occhio dovrebbero essere indipendenti dalla posizione iniziale del centro dello sguardo rispetto alla testa.

Un terzo metodo per studiare i tubercoli ottici superiori è quello di esaminare i campi di risposta sensoriale delle loro cellule e paragonarli con i campi di risposta sensoriale delle cellule nelle vie di senso principali. Questo tipo di ricerca è stato condotto in modo particolare con cellule dei tuberco-

li che rispondono a stimoli visivi, sebbene siano state studiate anche alcune proprietà di cellule che rispondono a stimoli uditivi e somatici. Alcuni anni fa, Peter Sterling e io, lavorando al laboratorio di David H. Hubel e Torsten N. Wiesel alla Harvard Medical School, ci accingemmo a studiare i campi di risposta di cellule degli strati superficiali dei tubercoli superiori di gatti. Nei nostri esperimenti il gatto aveva di fronte uno schermo distante circa 150 cm. Mentre si inseriva un microelettrodo nei tubercoli, sullo schermo venivano presentate linee chiare e scure e figure allungate. Tentammo di trovare il campo di risposta di ogni cellula in cui effettuavamo le registrazioni e di caratterizzare gli stimoli visivi che erano piú efficaci nell'evocare i potenziali d'azione dalla cellula.

La prima cosa che notammo fu che i campi di risposta dei tubercoli ottici erano di solito da due a tre volte piú grandi dei campi di risposta delle cellule della corteccia visiva i cui campi si trovano dalla stessa parte del campo visivo. Abbiamo anche notato che la maggior parte delle cellule dei tubercoli rispondeva soltanto a stimoli in movimento. Stimoli stazionari fatti lampeggiare nel campo visivo risultavano quasi totalmente inefficaci per la maggior parte delle cellule. Circa tre quarti delle cellule esaminate erano selettive anche per quanto riguarda la direzione. Questo significa che esse rispondevano bene al movimento in una direzione e scarsamente o affatto al movimento nella direzione diametralmente opposta. Hubel e Wiesel avevano precedentemente dimostrato che anche molte cellule della corteccia visiva sono selettive per la direzione.

La selettività direzionale delle cellule della corteccia, tuttavia, è completamente differente dalla selettività direzionale dei tubercoli. In primo luogo, cambiando l'orientamento dello stimolo e la direzione del suo movimento di 20 o 30 gradi dal punto ottimale si provoca una notevole diminuzione della risposta delle cellule corticali, mentre la diminuzione della risposta delle cellule dei tubercoli ottici è scarsa o nulla. Infatti, gli stimoli che si spostano di 90 gradi verso la direzione prescelta, spesso evocano una risposta altrettanto forte da parte delle cellule dei tubercoli superiori sebbene tali stimoli siano completamente inefficaci per le cellule corticali.

L'influenza corticale sui tubercoli ottici è stata studiata asportando la maggior parte della corteccia visiva nei gatti. Sono stati osservati tre effetti principali. In animali con estese lesioni corticali, numerose cellule rispondono a stimoli stazionari, mentre negli animali normali la maggior parte delle cellule non risponde (*a*). Dopo aver prodotto la lesione, le cellule dei tubercoli non sono piú sensibili alla direzione in cui si muovono gli stimoli visivi (*b*). Negli animali con lesioni corticali, le cellule dei tubercoli rispondono quasi esclusivamente alla stimolazone dell'occho controlaterale, mentre negli animali normali esse reagiscono alla stimolazione di entrambi gli occhi (*c*).

Quindi, le cellule dei tubercoli ottici rispondevano in un ambito di direzioni molto piú grande rispetto alle cellule corticali. In secondo luogo, per le cellule dei tubercoli la direzione nulla, la direzione cioè che evoca la risposta minima, era sempre diametralmente opposta alla direzione prescelta, mentre per le cellule corticali la direzione nulla forma un angolo di 90 gradi rispetto alla direzione prescelta e il movimento opposto alla direzione di solito evoca una certa risposta (*si vedano le due illustrazioni in alto a pagina 72*). Inoltre nella corteccia visiva non c'è alcuna indicazione per la quale una qualsiasi direzione prescelta sia piú frequente di un'altra.

Tuttavia, nei tubercoli ottici, la distribuzione delle direzioni prescelte o era parallela al meridiano orizzontale del campo visivo, oppure formava rispetto a esso un angolo inferiore a 45 gradi. In secondo luogo per piú di tre quarti delle unità selettive per la direzione, la componente orizzontale era lontana dal centro dello sguardo e spostata verso la periferia del campo visivo. Quindi la maggior parte delle cellule che erano registrate nel tubercolo destro avevano campi di risposta nel campo visivo sinistro e rispondevano meglio al movimento che andava da destra a sinistra. Questo risultato è stato confermato e ampliato dal lavoro di M. Straschill e K. P. Hoffman del Max Planck Institut di Monaco, i quali trovarono che le cellule con campi di risposta nella parte superiore del campo visivo avevano direzioni preferenziali con componenti verticali verso l'alto, mentre cellule con campi di risposta nella parte inferiore del campo visivo avevano direzioni preferenziali con componenti verticali verso il basso.

Abbiamo anche osservato che le cellule corticali sono piú complesse per quanto riguarda la dimensione e la forma dello stimolo delle cellule dei tubercoli ottici. Una tipica cellula corticale complessa risponde soltanto a stimoli visivi corrispondenti a una fessura, a una linea o a un margine. Le cellule corticali hanno anche una precisa necessità per quanto riguarda l'ampiezza e l'orientamento dello stimolo. Le cellule corticali di tipo ancora piú complesso hanno bisogno anche che lo stimolo abbia una lunghezza specifica.

Al contrario, la maggior parte delle cellule dei tubercoli quadrigemini superiori risponde bene a una notevole gamma di stimoli. Per circa il 90 per cento delle cellule, tuttavia, il campo di risposta consiste in una zona attivante e in una repressiva, proprio al di fuori di quella attivante. Gli stimoli limitati alla regione attivante (anche se erano molto piú piccoli di quella regione) evocano una risposta intensa. Se, tuttavia, lo stimolo è abbastanza grande da invadere la regione repressiva, la velocità di eccitazione della cellula comincia a diminuire (*si veda l'illustrazione in alto a pagina 74*). Cosí le cellule negli strati superficiali dei tubercoli superiori del gatto tendono a rispondere di piú a piccoli oggetti in movimento che a oggetti grandi.

La relativa insensibilità delle cellule dei tubercoli ottici alla dimensione, alla forma, e all'orientamento degli stimoli, fa pensare che questi non siano interessati alla esatta natura dello stimolo, ma essenzialmente alla sua direzione e al movimento. Le cellule dei tubercoli ottici molto probabilmente sono attivate se lo stimolo si muove verso la periferia del campo visivo. Questa è esattamente l'informazione di cui un animale ha bisogno allo scopo di controllare il movimento della sua testa e dei suoi occhi e di evitare che uno stimolo lasci il suo campo visivo.

Sterling e io eravamo perplessi sul perché le cellule dei tubercoli richiedessero una stimolazione non ben definita per quanto riguarda la dimensione e la forma, in considerazione del fatto che esse ricevono impulsi sensoriali dalle cellule della corteccia visiva che richiedono stimoli precisi. Allo scopo di studiare la funzione dello stimolo corticale sui tubercoli quadrigemini, abbiamo asportato la corteccia visiva di diversi gatti. Due settimane dopo l'asportazione della corteccia visiva, trovammo dei cambiamenti nelle proprietà dei campi di risposta (*si veda l'illustrazione nella pagina a fronte*).

In primo luogo non trovammo alcuna cellula che fosse sicuramente selettiva per la direzione. In secondo luogo, quasi tutte le cellule dipendevano soltanto dall'occhio controlaterale. Nei tubercoli ottici normali maggior parte delle cellule può essere stimolata

I campi di risposta visivi e uditivi, quando vengono riportati su una mappa mostrano un alto grado di corrispondenza per ciò che riguarda le cellule profonde dei tubercoli ottici. I punti scuri rappresentano la collocazione dei margini principali dei campi di risposta di cellule che rispondono sia a stimoli visivi che uditivi. I punti chiari rappresentano la posizione dei margini per cellule che rispondono soltanto a stimoli uditivi. Si è supposto che la posizione dei margini dei campi di risposta visivi per tali cellule sia il margine del campo della cellula piú vicina che risponde agli stimoli visivi.

da entrambi gli occhi. Anche la maggior parte delle cellule corticali è stimolata da entrambi gli occhi e di conseguenza anche le altre cellule corticali con le quali esse sono connesse da sinapsi sono stimolate binocularmente. La stimolazione retinica dei tubercoli ottici, d'altra parte, proviene principalmente dall'occhio controlaterale; relativamente piccola è la stimolazione proveniente dall'occhio dello stesso lato. In terzo luogo, negli animali nei quali era stata prodotta la lesione, un numero maggiore di cellule poteva essere eccitato da stimoli stazionari fatti lampeggiare nell'ambito del campo di risposta, rispetto agli animali normali.

Sebbene molte delle caratteristiche precise dei campi di risposta corticali si perdano quando gli assoni di molte cellule corticali convergono su un'unica cellula dei tubercoli, le proprietà essenziali dei suoi campi di risposta dipendono dalla presenza della proiezione corticale verso i tubercoli ottici. Quindi esso non può svolgere le sue normali funzioni senza ricevere i risultati della elaborazione corticale dell'informazione visiva.

Quando mi trasferii all'Università dell'Oregon, mi dedicai prevalentemente allo studio delle proprietà delle cellule situate negli strati piú profondi dei tubercoli superiori del gatto. Sterling e io non avevamo studiato queste cellule ad Harvard perché avevamo trovato che negli animali anestetizzati con barbiturici, che avevamo usato nei nostri esperimenti, le cellule non rispondono affatto a stimolazioni sensoriali. All'Università dell'Oregon misi a punto un procedimento, simile a quello usato in numerosi laboratori, con il quale le cellule dei tubercoli ottici potevano essere studiate in animali anestetizzati.

Gli animali usati in questi esperimenti venivano preparati molte settimane prima che si effettuasse la registrazione vera e propria piantando nei loro crani quattro bulloni sterili e un pozzetto con un coperchio a vite. Du-

Le cellule dei tubercoli ottici di un gatto sono dotate di sensibilità tattile. La cellula qui rappresentata rispondeva quando qualcosa toccava leggermente una parte qualsiasi della superficie dorsale o laterale della zampa anteriore dell'animale. Le frecce sotto i tracciati indicano quando veniva applicato lo stimolo. La cellula risponde con una breve scarica di impulsi quando l'animale è toccato con una spazzola di pelo di cammello (*a*). Tuttavia, quando la zampa anteriore viene pizzicata per un istante non c'è apparentemente alcun cambiamento nel quadro della normale attività della cellula (*b*). Quando la spazzola viene mossa leggermente nel campo di risposta somatico (*c*), la cellula risponde immediatamente con una intensa scarica di impulsi. La cellula risponde anche a stimoli visivi nella porzione inferiore del suo campo di risposta visivo.

rante gli esperimenti la testa dell'animale veniva sostenuta con i bulloni e l'elettrodo veniva inserito attraverso il pozzetto. Quindi l'animale non aveva ferite aperte o punti di pressione e non aveva bisogno di essere anestetizzato. Trovai che molte delle cellule situate negli strati piú profondi avevano campi di risposta visivi che erano molto simili ai campi di risposta visivi delle cellule negli strati superficiali. I campi erano, tuttavia, molto vasti; a volte coprivano un intero quadrante o metà del campo visivo. Inoltre, le cellule profonde rispondevano a una varietà di dimensioni e forme di stimoli anche piú grande rispetto alle cellule superficiali.

La variazione piú evidente che si incontrava quando l'elettrodo lasciava gli strati superficiali e penetrava in quelli in profondità, era la presenza di cellule che rispondevano a stimoli uditivi e somatici. Alcune cellule rispondevano soltanto a stimoli uditivi o a stimoli somatici, ma un gran numero rispondeva sia a stimoli visivi che somatici e poche rispondevano sia a stimoli visivi che somatici. Le cellule che rispondevano a stimoli uditivi rispondevano in modo particolare a suoni complessi come il fischio prodotto dal movimento dell'aria in un tubo parzialmente compresso.

La caratteristica piú evidente delle cellule che rispondono sia a stimoli uditivi che a stimoli visivi era che molti dei requisiti necessari per rispondere a stimoli uditivi erano simili a quelli necessari per gli stimoli visivi. Le cellule avevano campi di risposta uditivi e cosí pure campi di risposta visivi. Vale a dire che esse non rispondevano a suoni posti in un qualsiasi luogo rispetto alle orecchie del gatto, cosí come non rispondevano a stimoli visivi posti in un luogo qualsiasi rispetto agli occhi del gatto. Infatti, c'era una sorprendente correlazione, sebbene lontana da una esatta corrispondenza, tra la posizione del margine principale del campo di risposta visivo e la posizione del margine principale del campo di risposta uditivo. (Il margine principale del campo di risposta è il punto in cui lo stimolo evoca per la prima volta una risposta da una cellula del tubercolo ottico quando entra nel campo di risposta nella direzione richiesta.) Quindi i tubercoli ottici coinvolgono non soltanto una mappa dello spazio visivo, ma anche una mappa dello spazio uditivo.

La maggior parte delle cellule che risponde al rumore richiede uno stimolo in movimento. Accendere e spegnere uno stimolo stazionario era pressoché inefficace. Molte cellule erano selettive per la direzione sia per gli stimoli uditivi che per quelli visivi e la componente orizzontale della direzione prescelta era quasi sempre verso la periferia del campo controlaterale per entrambi i tipi di stimolo (*si veda l'illustrazione alla pagina precedente*).

Alcune cellule rispondevano alla stimolazione per contatto di una particolare regione del corpo, come la zampa posteriore controlaterale o quella anteriore. Lo stimolo piú efficace per queste cellule era in genere una spazzola di pelo di cammello che arruffava il pelo del gatto quando veniva mossa nel campo sensibile. Le cellule sensibili al contatto non erano ovviamente indicate per scoprire stimoli dolorosi in quanto esse non rispondevano a una compressione o a un pizzico meglio che a un leggero stimolo (*si veda l'illustrazione in questa pagina*).

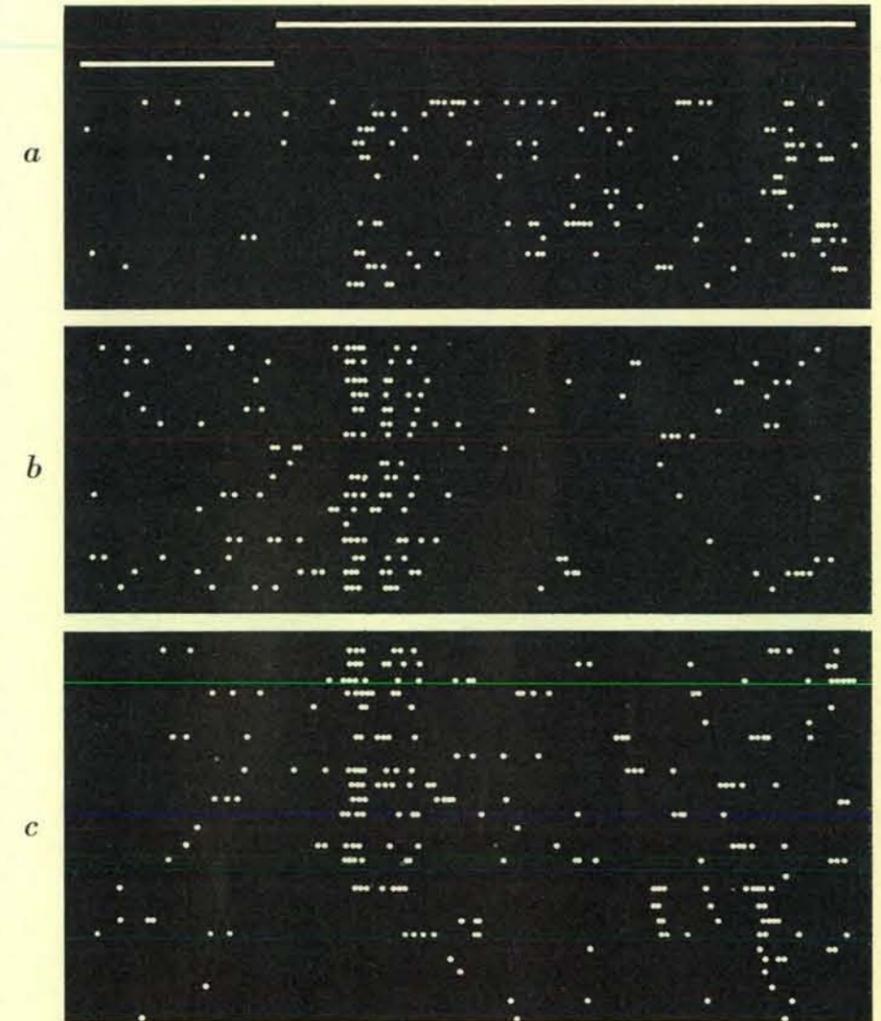
Sebbene fossero piuttosto poche le cellule che rispondevano sia a stimoli visivi che a stimoli somatici, la posizione del campo di risposta somatico di una cellula era in relazione alla posizione dei campi di risposta delle cellule vicine che rispondevano a stimoli visivi. Sembra cosí che gli strati profondi dei tubercoli quadrigemini superiori racchiudano mappe topografiche sovrapposte dei campi visivo, uditivo e somatico. Queste mappe sono molto meno precise delle mappe trovate nei nuclei delle vie sensoriali principali e negli strati superficiali dei tubercoli. Inoltre i campi di risposta di cellule individuali sono molto piú grandi dei campi di risposta di cellule delle vie sensoriali principali.

Le cellule degli strati piú profondi dei tubercoli ottici sembrano in grado di integrare le informazioni sulla posizione e direzione approssimate del movimento degli stimoli che colpiscono sia il sistema uditivo che quello visivo. L'attività delle cellule vicine riguarda la posizione approssimata degli stimoli somatici. Sembra ragionevole concludere che queste formazioni mesencefaliche permettono di orientarsi visivamente e di ricercare e di seguire uno stimolo senza tener conto della sua origine.

Molti animali non si orientano ripetutamente in seguito a successive presentazioni dello stesso stimolo a meno che l'animale non sia premiato o punito per dare una risposta. Questa diminuzione della risposta è detta assuefazione. Ci si potrebbe aspettare che le cellule dei tubercoli quadrigemini si abituino a ripetute presentazioni dello stesso stimolo, e in effetti questo è quanto accade nei gatti fortemente anestetizzati. (L'assuefazione rende estremamente difficile, per lo sperimentatore, controllare i suoi dati sullo stimolo ottimale per ogni data cellula.) Wurtz e Goldberg hanno recentemente condotto un ingegnoso esperimento con le scimmie dimostrando che le cellule dei tubercoli si abituano soltanto quando lo stimolo non ha alcun significato comportamentale. Le cellule particolari che essi avevano esaminato si trovavano negli strati superficiali. Gli animali venivano allenati a fissare una piccola macchia luminosa. Essi venivano quindi premiati affinché spostassero il punto di fissazione dello sguardo su una seconda fonte di luce, quando la prima veniva spenta. Questo esercizio viene denominato condizione di movimento dell'occhio. Se ambedue le luci rimanevano accese, gli animali continuavano a fissare la prima sorgente luminosa (condizione di immobilità). Wurtz e Goldberg fecero registrazioni in singole cellule dei tubercoli ottici di animali allenati in entrambe le condizioni.

In primo luogo essi realizzavano la condizione di immobilità dell'occhio: l'animale fissava una macchia e la cellula rispondeva (come ci si aspettava) a una seconda fonte di luce accesa nel campo di risposta della cellula. Tuttavia, quando questa veniva presentata ripetutamente, la risposta della cellula tendeva alla assuefazione (le cellule dei tubercoli ottici delle scimmie, a differenza di quelle dei gatti, non sono selettive per la direzione e non richiedono stimoli in movimento). Wurtz e Goldberg realizzarono quindi la condizione di movimento dell'occhio: lo stimolo fisso veniva spento nel momento in cui lo stimolo del campo di risposta veniva acceso. La scimmia quindi faceva un rapido movimento dell'occhio verso lo stimolo del campo di risposta. (Dopo questo movimento, naturalmente, lo stimolo del campo di risposta non si trovava piú per lungo tempo nel campo di risposta della cellula dalla quale essi facevano le registrazioni.) La cellula non risultava assuefatta durante ripetute presentazioni della condizione di movimento dell'occhio. Anzi, la risposta iniziale qualche volta era aumentata, la cellula cioè si eccitava piú spesso durante la condizione di movimento dell'occhio rispetto a quanto avveniva in risposta alla prima presentazione di questo stimolo durante la condizione di immobilità dell'occhio. L'aumento era specifico per i movimenti provocati da stimoli nell'ambito del campo di risposta della cellula. Non c'era alcun aumento se la stimolazione dell'occhio che controllava i movimenti era al di fuori del campo di risposta della cellula.

L'aumento non richiedeva un effettivo movimento dell'occhio, ma era sufficiente che lo stimolo avesse un significato comportamentale per l'animale. Quando l'animale era ritornato nella condizione di immobilità, la maggior eccitabilità della cellula veniva mantenuta per parecchie prove (*si veda l'illustrazione nella pagina a fronte*). Cosí, la risposta aumentata sembra essere in relazione al fatto che l'animale « pone attenzione » allo stimolo. Forse l'assuefazione delle cellule dei tubercoli ottici del gatto profondamente anestetizzato dipende dall'incapacità dell'animale di muovere gli occhi in risposta a stimoli sensoriali e dalla sua mancata attenzione a presentazioni successive dello stesso stimolo.

Forse la piú diretta dimostrazione che le cellule dei tubercoli superiori sono strettamente connesse ai movimenti dell'occhio, è stata fornita da esperimenti in cui scimmie venivano esercitate a muovere gli occhi in un modo particolare che permetteva di studiare il comportamento delle cellule mesencefaliche. Esperimenti di questo tipo sono stati fatti indipendentemente da Schiller del MIT e da

In questi tre gruppi di registrazioni effettuate nei tubercoli superiori di una scimmia è mostrato l'effetto della risposta oculare. L'interruzione della linea orizzontale in alto mostra quando ha inizio una stimolazione visiva nel campo di risposta di una unità funzionale dei tubercoli ottici. Ogni linea di punti mostra come una cellula risponde a una presentazione dello stimolo. L'insieme dei tracciati in *a* mostra la risposta quando lo stimolo non ha piú alcun significato comportamentale per l'animale, cioè, quando una luce (che rappresenta il punto di fissazione) non viene spenta quando viene accesa la luce nel campo di risposta. Lo stimolo viene quindi presentato come la seconda luce in una sequenza di due luci; la luce che l'animale fissa viene spenta quando la luce del campo di risposta viene accesa. Quando l'animale sposta rapidamente lo sguardo verso la seconda luce viene premiato. I tracciati in *b* mostrano l'aumentata eccitazione dell'unità dei tubercoli dopo che questi rapidi movimenti hanno acquistato un significato comportamentale. I tracciati in *c* mostrano una sequenza in cui le due luci sono di nuovo presentate come in *a* (la condizione oculare di non-movimento). L'unità dei tubercoli viene eccitata per un breve periodo in modo intenso, quindi l'eccitazione diminuisce. Gli esperimenti sono stati eseguiti al National Institute of Mental Health.

Wurtz e Goldberg. Essi trovarono che le cellule degli strati superficiali dei tubercoli ottici della scimmia avevano campi di risposta visivi, ma non rispondevano in rapporto ai movimenti dell'occhio. Tuttavia, l'attività di molte cellule dello strato profondo era chiaramente in relazione con i movimenti dell'occhio.

Nel laboratorio di Wurtz e Goldberg queste cellule sono state studiate in esperimenti del tutto simili a quelli utilizzati per studiare le risposte aumentate. Gli animali erano allenati a muovere gli occhi quando un punto fisso luminoso veniva spento e un secondo veniva acceso in una parte diversa del campo visivo. Le cellule che si eccitavano in rapporto ai movimenti dell'occhio entravano in azione da 300 a 30 millisecondi prima che avessero inizio i movimenti dell'occhio. Il tempo di risposta della cellula era correlato con l'inizio dei movimenti dell'occhio piú strettamente che con la presentazione dello stimolo visivo che provocava il movimento.

Ogni cellula ha ciò che Wurtz e Goldberg chiamano un campo di movimento, cioè la cellula risponde soltanto in connessione con i movimenti dell'occhio verso un'area particolare del campo visivo. La nozione di campo di movimento implica che le cellule rispondano soltanto in connessione con i movimenti dell'occhio di una data misura. Se un animale muove gli occhi in direzione del campo di movimento, ma il movimento si arresta bruscamente fuori del campo di movimento, o si estende al di là del suo limite estremo la cellula non si eccita. Naturalmente anche nel caso in cui gli occhi si muovano in una direzione che non è quella del campo di movimento, la cellula non si eccita. Molte cellule che rispondevano in connessione a movimenti degli occhi avevano anche campi di risposta visivi. Per ogni data cellula il campo di risposta visivo e il campo di movimento erano nella stessa regione del campo visivo, ma non erano di solito esattamente sovrapposti.

Il campo di movimento di una singola cellula era indipendente dalla posizione iniziale degli occhi rispetto al capo. Questo dato è proprio ciò che ci si aspettava sapendo che la misura e la dimensione dei movimenti dell'occhio provocati da stimolazione elettrica dei tubercoli ottici sono indipendenti dalla posizione degli occhi. Le cellule dei tubercoli superiori non codificano una specifica quantità di tensione per ciascuno dei muscoli che muovono gli occhi, ma possono codificare cambiamenti specifici del punto di fissazione. Wurtz e Goldberg sottolineano che, poiché i campi di movimento delle cellule dei tubercoli sono piuttosto estesi, talvolta fino a 10 e 20 gradi su un lato, le cellule attive probabilmente non fanno altro che girare gli occhi dell'animale verso quella regione del campo visivo dove appare lo stimolo; è poco probabile invece che esse forniscano il tipo di controllo adatto a una precisa concentrazione visiva.

Il concetto generale che emerge da questi studi sui tubercoli quadrigemini superiori e la corteccia visiva di gatti e scimmie è che la corteccia elabora informazioni sensoriali al fine di determinare la natura dello stimolo. I tubercoli ottici determinano invece la posizione e la direzione dello stimolo, al fine di porlo al centro del campo visivo e di mantenerlo lí. Metodi sperimentali differenti hanno, tuttavia, fornito dati un po' diversi.

Nei gatti, lesioni dei tubercoli ottici provocano deficienze nell'orientamento in risposta a stimoli uditivi, visivi e somatici e nell'apprendimento di esercizi visivi che richiedono frequenti cambiamenti nel punto di fissazione. Queste lesioni diminuiscono anche la rapidità con cui le scimmie possono cambiare il loro punto di fissazione. La stimolazione elettrica dei tubercoli ottici nelle scimmie provoca movimenti dell'occhio; l'entità e la direzione del movimento dipendono dalla regione stimolata. Studi sui campi di risposta mostrano che singole cellule dei tubercoli ottici del gatto rispondono a stimoli visivi e uditivi che si allontanano dall'animale. Probabilmente le risposte di queste cellule provocano movimenti dell'occhio che mantengono gli stimoli nel campo visivo, ma questo rapporto non è stato ancora dimostrato.

Le cellule dei tubercoli ottici della scimmia si assuefanno rapidamente a stimoli visivi se questi non hanno un significato comportamentale per l'animale. Tuttavia, la risposta viene mantenuta e perfino aumentata se l'inseguimento visivo è utile. Infine, gli strati profondi dei tubercoli quadrigemini della scimmia contengono cellule che rispondono prima dell'occhio a movimenti aventi dimensioni e direzione specifiche. Sembra ragionevole supporre che le stimolazioni provenienti da queste cellule favoriscano l'inizio dei movimenti dell'occhio. Poco si sa invece su come l'informazione viene trasmessa ai motoneuroni che controllano i movimenti della testa o degli occhi. Sappiamo solo che non ci sono connessioni monosinaptiche (vale a dire dirette) dai tubercoli ottici ai motoneuroni degli occhi o del collo che controllano i movimenti della testa.

Le incisioni rupestri della Valcamonica

Le antiche popolazioni che dimorarono in Valcamonica hanno lasciato evidenti tracce del loro passaggio ricoprendo le rocce con migliaia di incisioni

di Vincenzo Fusco

La Valcamonica è un solco vallivo con andamento medio da nord-est a sud-ovest (percorso oggi dal fiume Oglio) che dalle pendici del Passo del Tonale giunge fino al Lago d'Iseo. Durante il Pleistocene fu occupato da una immane massa glaciale, dello spessore di varie centinaia di metri, che scendeva lentamente verso la pianura trascinando con sé macigni, pietre, sassi, sabbia, detriti e quanto altro il suo enorme peso e il suo movimento riusciva a sgretolare e frantumare; fu questa coltre di ghiaccio che riuscí in tal modo a levigare, come un gigantesco abrasivo, le rocce che vennero a trovarsi sul suo cammino.

Mentre nelle parti piú alte, ai due lati della valle, il lavoro di corrosione creò pareti precipiti, sulle parti mediane e sul fondovalle si ebbe un susseguirsi di roccioni color grigio-violaceo di arenaria permiana, ben smussati e levigati come enormi dorsi di balena. Sono queste le rocce, soprattutto nel tratto mediano della valle, tra Sonico a nord e Boario a sud, che presentano quello spettacolare complesso di incisioni preistoriche e protostoriche, che hanno fatto diventare la Valcamonica uno dei piú importanti centri d'arte rupestre d'Europa.

Le raffigurazioni, che assommano ormai ad alcune decine di migliaia mentre se ne scoprono sempre di nuove, presentano una vastissima casistica davvero sconcertante, ora con istoriazioni naturalistiche, ora con altre di tipo geometrico, ora infine del tutto astratte; talvolta l'incisione è precisa e minuta fino ai minimi particolari, talaltra è magistralmente, o elementarmente, sintetica e sommaria; frequentissime sono le figure apparentemente mozze o frammentarie, ma tutto fa presumere che tale incompletezza sia voluta e predisposta, per motivi che non riusciamo sempre a interpretare.

È comprensibile pertanto come questo complesso di elementi antitetici, a cui si aggiungono numerose sovrapposizioni, evidenti differenze di tecnica, variazioni notevoli di destrezza, nonché disformità di patina, abbia contribuito a non far trovare concordi tutti gli studiosi circa l'attribuzione cronologica da assegnare alle varie fasi, che certamente si sono susseguite per un arco di tempo di vari secoli, da parte di popolazioni forse appartenenti a un unico ceppo iniziale, ma che ovviamente dovettero subire col tempo influssi culturali e scambi materiali con altre genti.

Prove di laboratorio farebbero supporre che buona parte delle incisioni dovettero essere ottenute con strumenti metallici, il che le farebbe attribuire a tempi non anteriori al II millennio a.C.; d'altra parte taluni raffronti tipologici tra petroglifi e oggetti reali, noti in paletnologia e appartenenti a stazioni preistoriche di altre plaghe, consentirebbero per altri casi una retrodatazione a tempi neo-eneolitici.

Se il complesso petroglifico della Valcamonica può considerarsi uno dei piú ricchi e dei piú studiati, e perciò uno dei piú conosciuti del genere, dobbiamo però dire che siamo ancora lontani da una sua completa e soddisfacente interpretazione.

La scarsezza di reperti, fittili o metallici, costituisce infatti una sconcertante lacuna, che gli studiosi cercano di colmare con illazioni, parallelismi e similitudini, talvolta logiche e banali, talaltra audaci e singolari; ma rimane, al fondo della questione, l'incertezza di aver saputo interpretare perfettamente ogni cosa. Incertezza che è forse motivo di sconforto, ma al tempo stesso è stimolo incessante a penetrare sempre piú nell'ignoto di quel suggestivo mondo.

Se il pensiero corre alle relativamente poco numerose generazioni che ci separano dai tempi in cui vissero le genti che tracciarono su quelle rocce le numerose incisioni, in un arco di tempo abbastanza delimitabile, parrebbe logico supporre che il nostro modo di pensare possa considerarsi vicino e diretto erede del loro.

Sotto le nuove forme dello spirito, gli strati delle esperienze arcaiche rimangono sepolti sempre piú profondamente e senza l'ausilio di apporti concreti, il nostro tentativo di pescare nell'inconscio e far rivivere il ricordo filogenetico, diventa una paurosa fatica.

Certo per noi è difficile staccarci dal pensiero logico-razionale e far vibrare soltanto quella sensibilità che attinge all'eredità naturale, ma se è vero, come è vero, che viviamo nelle vestigia dei sentimenti dei nostri proavi, è questa la pista che dobbiamo decisamente battere.

In questa ricerca ogni nostro tentativo non può essere vano, bensí può aiutarci a ricostruire nel tempo le sembianze dell'umanità trascorsa, dell'uomo di un tempo, coi suoi bisogni, con le sue lotte, coi suoi sentimenti, coi suoi miti.

Le scoperte piú recenti

Sono tali e tante le raffigurazioni ormai note, individuate sulle rocce della Valcamonica, a opera di vari stu-

Nella pagina a fronte sono illustrate due scene incise nella roccia n. 101 scoperta di recente nel Parco di Naquane. Le due figure equestri (*in alto*), di cui una con arma astiforme, parrebbero un cavaliere seguito dal proprio scudiero, oppure da un prigioniero mutilo o legato a un somaro. I due individui che si affrontano nudi (*in basso*), come in molte altre figure già note, ricevono dalla lotta una eccitazione itifallica. Poco sotto un quadrupede a lunga coda, figura rara nel patrimonio delle incisioni camune.

La cartina rappresenta quella parte della Valcamonica in cui si trovano i luoghi piú interessanti per i paletnologi. La S.S. n. 42 è la statale del passo del Tonale; la linea nera piú intensa è la ferrovia Brescia-Edolo.

diosi i cui meriti sono consacrati nella vasta bibliografia, che quasi si stenta a credere che ne possano venire alla luce altre.

Talvolta trattasi di vere scoperte, nel significato letterale della parola, in quanto si scoprono talune rocce dal terreno che le ricopriva; altre volte invece è l'esame piú attento o strumentale di talune zone che può consentire interpretazioni nuove, o degne comunque di ripensamenti, o che convalida, con maggior convinzione, ipotesi già pronunciate.

Le indagini e le ricognizioni compiute in questi ultimi anni, per conto della Soprintendenza alle antichità della Lombardia si sono mosse nelle direzioni già accennate. L'attenzione è stata innanzitutto attirata da alcune rocce che già affioravano per un tratto e che lasciavano supporre, per il loro andamento orizzontale o poco inclinato, che nascondessero altra parte interessante sotto una coltre terrosa di una certa consistenza ma non eccessiva.

Queste ricerche hanno cosí permesso di portare alla luce incisioni di notevole interesse soprattutto nella zona del Parco nazionale delle incisioni rupestri di Naquane, nel territorio del comune di Capo di Ponte.

Tale Parco è stato istituito nel 1955 dalla Soprintendenza alle antichità della Lombardia a cura del professor M. Mirabella Roberti, per racchiudervi il gruppo piú ragguardevole delle incisioni camune, facilitandone la visita per gli studiosi e i turisti; l'iniziativa si è dimostrata molto opportuna per proteggere il piú possibile una buona parte del patrimonio petroglifico dai vandalismi degli incompetenti e anche dall'azione di impiastricciamento che taluni studiosi fanno su parecchie rocce con sostanze coloranti indelebili, sia pure con la buona intenzione di ritrarre a scopo di studio le figurazioni incise.

Il Parco comprende un centinaio di rocce, su cui son presenti circa 7000 figure incise, di cui circa 870 sulla sola roccia indicata col numero 1 e detta anche Roccia Grande di Naquane.

Nel Parco, oggetto delle nostre ricerche furono in particolare le rocce n. 8 e 101 e, nelle vicinanze, una roccia nei pressi dell'ingresso e alcune altre nella zona Foppe di Nadro. Oggetto di osservazione furono infine alcuni macigni di particolare interesse, uno a monte di Breno e l'altro a valle di Paspardo. Le numerose rilevazioni compiute meritano una esposizione analitica per ogni genere di raffigurazioni.

Costruzioni

Le incisioni di nostra nuova scoperta che rappresentano delle costruzioni sono una trentina, concentrate per lo piú sulla cosiddetta Roccia Ruggeri. Nel loro assieme non si staccano dai tipi già noti altrove sulle rocce camune, se non per la grandezza notevole di un paio di esse, che trova peraltro paralleli su altri roccioni, come la n. 57, e una certa complessità compositiva di talune incisioni interpretabile come tentativo di rappresentazione prospettica. Altre costruzioni minori si staccano invece per la singolarità della figura, che tradirebbe pertanto una diversa destinazione del soggetto.

Le costruzioni della Roccia Ruggeri sono tutte orientate in direzione est-ovest, come se dovessero cioè essere viste tutte da ovest, dal basso; nel loro assieme si presentano come se si avesse voluto rappresentare un intero villaggio.

In genere si tratta di incisioni a solco piuttosto ben marcato, ma dai bordi non netti, bensí denticolati che alla osservazione con forte lente si presentano discontinui, tali da potersi attribuire a uno strumento non molto appuntito.

Di solito le figure hanno una base rettangolare, in pochi casi completamente martellinata, un corpo centrale e un sottotetto, che può essere a sezione triangolare o, piú raramente, trapezoidale. Il tetto è a due spioventi poco inclinati, che spesso si incrociano alla sommità al centro. Frequenti le mensole che sporgono lateralmente dalla base o dal corpo centrale, spesso modulate cosí da figurare come sagome sinuose e talvolta interamente martellinate.

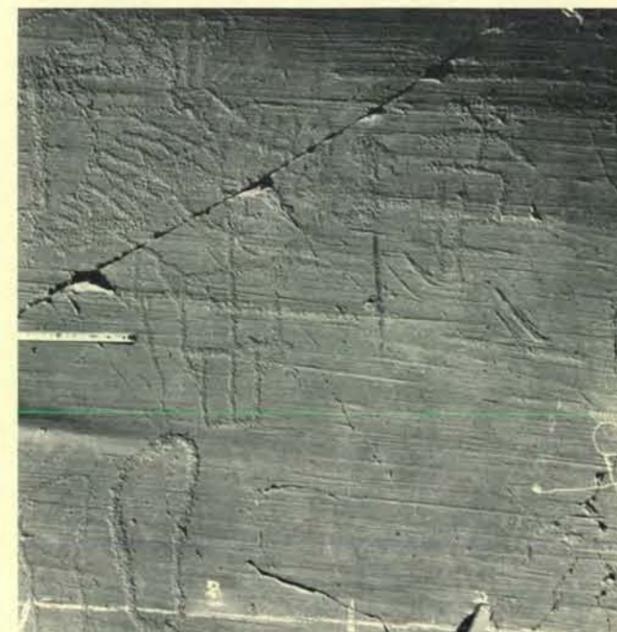
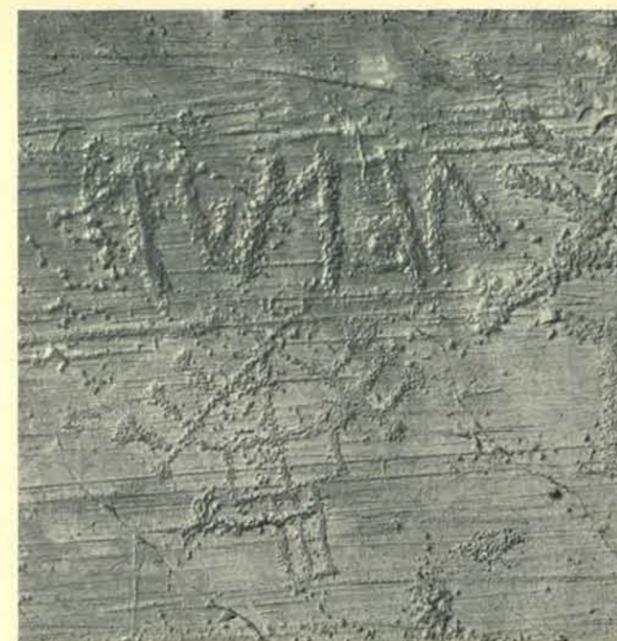
Questo alternarsi di zone lineari con zone analoghe ma coperte di martellinatura non si presta peraltro a una facile interpretazione. Il giudizio piú spontaneo farebbe pensare che le zone martellinate corrispondano a parti in pietra e che le altre corrispondano a parti in legname; ma se ciò può essere accettabile per le basi delle costruzioni, per le suddette mensole l'ipotesi sembra piú dubbia.

Le dimensioni variano alquanto e accanto a incisioni alte oltre mezzo metro se ne hanno alcune di poco piú di dieci centimetri. Dal gruppo si distinguono due grosse costruzioni aventi l'altezza rispettivamente di 60 e 52 centimetri, dalla base completamente martellinata: la prima di esse presenta un doppio tetto che poggia sulla medesima base e presenta lateralmente una piccola figura interpretabile come altare o altro soggetto di analoga natura; la seconda racchiude nel sottotetto una sagoma di impronta di piede sinistro, nonchè una incisione analoga a quella della costruzione precedente, anch'essa interpretabile come un soggetto di carattere rituale (*si vedano le figure nella pagina a fronte*).

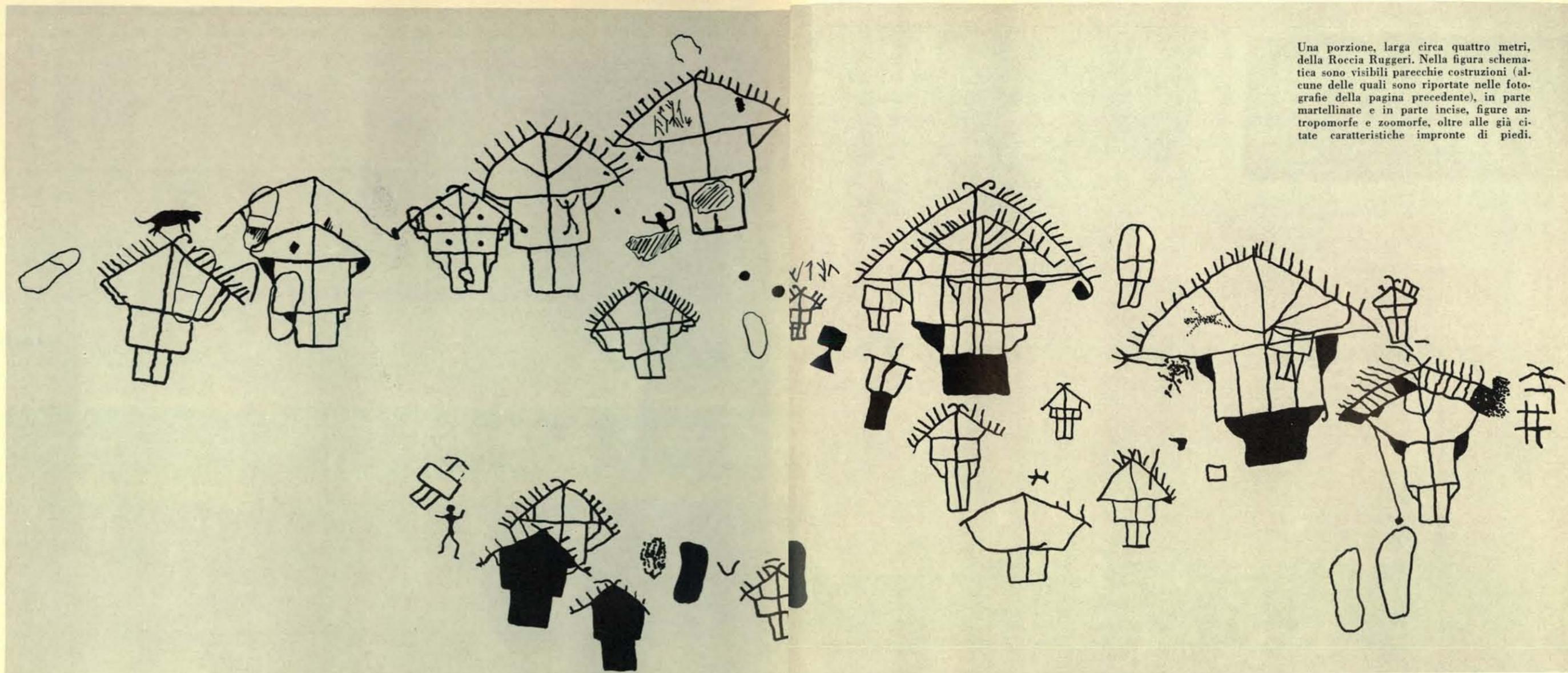
L'assieme di queste incisioni ripropone l'argomento suggestivo relativo all'interpretazione attribuibile alle raffigurazioni delle costruzioni, siano esse case o capanne o luoghi a destinazione diversa.

La loro abbondanza sulle rocce camune ha consentito, come è noto, a vari studiosi di descriverne le caratteristiche tipologiche ottenendo interessanti osservazioni, alcune delle quali concernono anche l'aspetto piú particolarmente artistico in senso stretto. Si è visto come anche talune delle raffigurazioni da noi scoperte si prestino infatti a considerazioni circa l'esistenza di tentativi di riproduzione prospettica e in realtà casi del genere non hanno soltanto qui gli esempi. Possiamo quindi ben dire che su questo genere di incisioni si sia ormai detto tutto.

Tuttavia, quello che sta certamente e

Incisioni di vario tipo nella Roccia Ruggeri illustrata schematicamente nelle due pagine seguenti. Le incisioni mostrano per lo piú costruzioni. La prima è alta circa 60 cm con tetto a sezione triangolare leggermente cupoliforme; al suo interno vi è una costruzione minore, alta circa 42 cm, il che fa pensare a un tentativo di rappresentazione prospettica di un'unica costruzione. La seconda mostra, sopra una costruzione, una iscrizione, probabilmente un nome di « gens ». La terza mostra un gruppo di costruzioni e la quarta, infine, una costruzione con due orme di piede sinistro, orme il cui significato è ancora in discussione.

giustamente piú a cuore agli studiosi, è la piú attendibile interpretazione delle costruzioni effigiate e la loro cosí scarsa correlazione con gli effettivi resti di insediamenti.

Caduta l'ipotesi, avanzata da taluni ricercatori, che poteva trattarsi di costruzioni palafitticole – affermazione infatti non piú sostenibile a fronte di varie considerazioni e dei risultati degli scavi con i quali non si rinvenne alcun resto attribuibile ad antichi fondi lacustri – sembra non sostenibile anche l'idea che potessero essere costruzioni erette a mezza costa sui due versanti della valle, i cui resti sarebbero infatti ormai del tutto scomparsi a causa del dilavamento che avrebbe trascinato ogni avanzo in fondo valle e poi portato via del tutto.

Il territorio camuno si è rivelato infatti estremamente avaro di reperti e parrebbe incomprensibile soprattutto la mancanza quasi assoluta di avanzi di ceramica. Sappiamo come questa sia in quasi tutte le stazioni preistoriche il predominante elemento, che consente valutazioni fondate su dati di fatto e non soltanto su considerazioni concettuali. A tale riguardo potrebbe anche essere discussa la valutazione, che viene data con una certa sicurezza da qualche studioso, circa la cronologia delle

Una porzione, larga circa quattro metri, della Roccia Ruggeri. Nella figura schematica sono visibili parecchie costruzioni (alcune delle quali sono riportate nelle fotografie della pagina precedente), in parte martellinate e in parte incise, figure antropomorfe e zoomorfe, oltre alle già citate caratteristiche impronte di piedi.

incisioni basandosi su criteri tipologici o di tecnica o di sovrapposizione di segni. Una valutazione del genere è certamente molto opportuna, tuttavia è arduo ammettere che possa giungere a una determinazione di cronologia assoluta come taluni sostengono; la mancanza di testimonianze piú sicure date da reperti reali, metallici, litici o ceramici, priva tali considerazioni di fondamento scientifico. Su tali premesse sembra perciò giustificabile il ricorso anche ad altre ipotesi, che possano trovare una certa base convincente.

Una di queste supposizioni, che vien qui espressa come ipotesi di lavoro, farebbe pensare alle incisioni che rappresentano costruzioni come riproduzioni di abitazioni o soggetti analoghi non già esistenti un tempo sul luogo, bensí delle località d'origine da dove potrebbero essere partite le genti che qui, nella media Valcamonica, devono essersi fermate per un tempo non facilmente valutabile. La poca inclinazione degli spioventi dei tetti di queste costruzioni, per esempio, farebbe pensare che non doveva trattarsi di manufatti eretti in zone soggette a forte innevamento, ma piú verosimilmente in zone di pianura, forse, ma non necessariamente, palustri, come potrebbero essere le località rivierasche del Lago d'Iseo o della media Valle dell'Oglio.

Potrebbe esserci stato, per esempio, un notevole movimento stagionale di genti, specialmente nell'età del bronzo, che salivano dalle zone di pianura verso la montagna specialmente per la caccia al cervo, dalla quale traevano, oltre al pellame e alle carni, un buon quantitativo di palchi di corna, materia prima preziosa e diffusissima nell'età del bronzo, per farne manici, attrezzi, utensili, armi, ornamenti.

Le incisioni che raffigurano i cervi ci danno anche una interessante indicazione circa l'epoca in cui dovevano presumibilmente avvenire tali battute venatorie, vale a dire dall'inizio della stagione estiva in poi, quando i cervi avevano cioè le corna in pieno completo sviluppo. Le incisioni rappresentano infatti di norma i cervi con palchi ricchi di pugnali, che fanno anche pensare si dovesse trattare per lo piú di individui anziani o vecchi. Con buona probabilità i cervi piú grossi dovevano essere i piú ricercati per l'abbondanza di materia prima, che poteva essere ottenuta dalle loro corna e le scene che ne raffigurano la cattura possono essere in gran parte interpretate anche come espressioni di magia venatoria, che ci ricordano quanto millenni prima avveniva con le pitture parietali paleolitiche, o, semplicemente, come descrizioni di tecnica di cattura, fatte da anziani esperti agli iniziati.

Le periodiche salite in valle potrebbero in parte spiegare la scarsezza di resti di insediamenti e di reperti vari, i quali sarebbero rimasti in pianura, mentre nel breve periodo estivo i cacciatori utilizzavano probabilmente soltanto tende o altre forme temporanee di abitazione e di ricovero.

Ciò spiegherebbe anche l'assenza di tombe isolate o di sepolcreti: verso la montagna e per quei pochi mesi venivano prevedibilmente avviati soltanto gli individui piú robusti, per cui minima doveva essere la probabilità di morte per questi, mentre il resto della popolazione restava a valle, nelle capanne, su palafitte o altro tipo di insediamento, dove donne, vecchi e bambini attendevano il ritorno dei gruppi di cacciatori a fine stagione.

Durante questo periodo si rende piú verosimile anche l'ipotesi di realizzazione di riti praticati, come si è accennato, per propiziare le buone cacce, come pure ogni altra manifestazione rituale o di culto che trovava sui macigni lisciati dai ghiacciai una sede naturale, logica e suggestiva al tempo stesso.

Figure varie

Il complesso delle altre incisioni messe da noi recentemente in luce è costituito da rappresentazioni di figure umane e animali: le prime sono in gran parte a corpo interamente martellinato e in parte con inciso il solo contorno e come tipologia non si staccano da quella nota e diffusa in molte altre rocce già note, trattandosi per lo piú di figure armate a braccia levate, spesso scudate; si distinguono una figura con una serie di coppelle in fila lungo le spalle, probabile sovrapposizione, e una figura umana molto simile a quelle altre della stessa roccia Ruggeri già note col nome di «danzatori» o «gladiatori»; non mancano infine figure incomplete, per lo piú prive di arti.

Le figure di animali sono per la quasi totalità di quadrupedi con o senza cavaliere, in posizioni quasi sempre alquanto statica.

Si hanno infine figure diverse, fra cui stelle a cinque punte, una vasta zona interamente martellinata sulla Roccia Ruggeri e varie coppelle, di cui parleremo piú avanti poiché meritano un cenno a parte.

Anche delle incisioni a tratto sottile, filiforme, si parlerà in seguito.

Problemi di interpretazione

Tra le incisioni da noi scoperte e le altre su cui mi sono piú soffermato ve n'è un certo numero costituito da una

Nella fotografia a sinistra sono ben visibili le caratteristiche incisioni a coppella sul Dos de la Lüera, di evidente realizzazione intenzionale. Nella fotografia a destra, oltre a una figura antropomorfa, è invece ben visibile un esempio di coppelle disposte a « modulo 8 » e incise sulla roccia n. 29 di Naquane (*si veda la tabella a fronte*). La freccia in colore indica la direzione del nord.

incisione circolare scodelliforme, normalmente di diametro da uno a quattro centimetri, la cui sezione può variare alquanto, da conica a tronco conica, a ogivale, a quasi emisferica, a rettangolare; nella letteratura preistorica sono note come « coppelle », termine che trova riscontro nel francese « cupules », nell'inglese « cups » o « cressets » e nel tedesco « Näpfchen » o « Schalen ».

Benché la loro area di diffusione sia vastissima su tutta la Terra, per cui il loro numero è elevatissimo, non si può dire che il loro esatto significato sia stato ovunque e in ogni caso interpretato: permangono, al contrario, molte incertezze causate dalla loro grande casistica, non tanto tipologica – in quanto trattasi pur sempre di scodelline circolari scavate nella roccia – quanto per la varietà delle loro composizioni e dei complessi figurativi ai quali possono trovarsi associate. Per quel che ci riguarda l'esame sarà qui limitato solo ad alcuni gruppi, che presentano tuttavia aspetti molto interessanti.

Sulle motivazioni che possono aver spinto le antiche popolazioni a incidere le coppelle un'ipotesi sembra meritare il giudizio di maggior attendibilità.

Le coppelle naturali sulle rocce, derivanti da cause meteoriche o geomorfologiche, devono essere state verosimilmente oggetto di culto feticista da parte delle genti preistoriche che, incapaci di spiegarne l'esistenza, devono averle attribuite a forze sovrumane, in cui si immedesimano soprattutto i grandi fenomeni naturali.

Nel riprodurre personalmente artificialmente tali coppelle, all'uomo parve di impossessarsi dell'emblema di queste misteriose forze e gli sembrò quello il modo piú logico e piú agevole di rappresentarle ogni volta che le sue esigenze lo avessero richiesto.

Ed è su questi presupposti che trova spiegazione l'esistenza di coppelle su rocce che vengon giustamente ritenute luoghi di culto, nel senso piú lato della parola, che possono comprendere le cerimonie o le funzioni piú diverse, ma pur sempre raggruppabili nell'ambito dei riti: dalle adorazioni naturalistiche, alle invocazioni, alle iniziazioni, alle propiziazioni, alle divinazioni, alle consacrazioni, alle pratiche di scongiuro o di ringraziamento, è tutto un assieme di manifestazioni culturali che dovevano essere esercitate da capi tribú, o capi religiosi, siano essi maghi o sacerdoti o sciamani.

Con l'azione intermediatrice di costoro, tra la divinità e l'uomo punto d'incontro è l'altare.

Tra gli obiettivi raggiunti con le nostre recenti indagini alcune località si sono rivelate, sotto questo punto di vista, di suggestiva attrattiva. Sulla sommità della montagna boscosa, nota come Cerreto di Breno, a circa 800 metri di quota a sud-est di Breno, si trova un grosso macigno di forma tondeggiante, di circa 3 metri di altezza per 2 di spessore, masso erratico ivi depositato dal ghiacciaio pleistocenico. Sul lato occidentale è stato parzialmente spaccato, forse per utilizzarne la pietra, ma la scheggia di roccia separatasi si trova tuttora sul posto.

Superiormente, nell'unica porzione del masso che sia un po' pianeggiante, sono state ricavate due coppelle, sicuramente opera umana, del diametro di tre centimetri, a sezione emisferica leggermente svasata. Sembra indubbio che tali coppelle debbano essere messe in relazione con l'utilizzo del masso come base di cerimonie rituali e lo lascia chiaramente intendere anche l'eloquente toponimo, noto nella tradizione locale come « Preda de l'altar » (Pietra dell'altare).

Il macigno, oltre alle due coppelle, non ha altri segni di lavorazione umana, salvo il guasto prodotto in tempi recenti; e ciò evidentemente perché è dalla sua stessa natura, dalla sua materia nuda, intatta, monumentale, che si sprigiona quella magica suggestione che l'ambiente alpestre cacuminale può aver ancor piú accresciuto, specialmente nei riguardi di genti venute forse da zone di pianura.

Il nome conservato nell'attuale toponimo ricorre peraltro anche in molte altre località, alle quali può attribuirsi un parallelo significato, anche se non cronologicamente contemporaneo. Roccia dell'Altare a Monte Bego è chiamata una zona da G. Bicknell, probabilmente raccogliendo una dizione lo-

ROCCIA	DISEGNO
1	
23	
25	
27	
29	
35	
37	
43	
44	

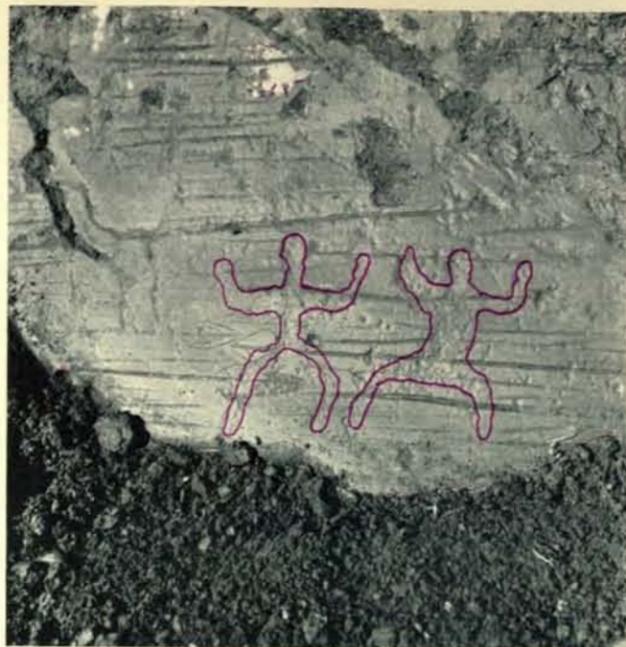
ROCCIA	DISEGNO
45	
47	
48	
74	

In questa tabella è raccolta una vasta serie di esempi di coppelle disposte a « modulo 8 » ritrovate su varie rocce del Parco delle incisioni rupestri di Naquane. Le incisioni con coppelle a « modulo 8 » sono spesso in associazione con altre incisioni.

cale. Roccia dell'Altare è ancora al Bric del Selvatico, presso Chiampernotto – Ceres. In Sardegna, presso Capo Caccia, la Grotta Verde ha come secondo toponimo quello di Grotta dell'Altare ed è interessante ricordare che vi sono graffiti incisi con tecnica filiforme su un masso presso un laghetto nella parte piú profonda; la fama del luogo come sede di culto si è trasmessa nel tempo, giungendo ai tempi romani, in cui si ha memoria di un culto delle ninfe degli antri marini e si è trasmessa poi almeno fino al XV secolo d.C. a cui risale un piccolo sacrario dedicato a S. Erasmo.

Nei pressi del Parco delle incisioni rupestri di Naquane sorge un roccione che abbiamo liberato dal terriccio che ne ricopriva altra parte, oltre quella già allo scoperto: sono state cosí messe in evidenza serie di grosse coppelle che coprono la parte piú pianeggiante e la cui destinazione rituale può esser messa in relazione al suggestivo toponimo che viene attribuito alla roccia, chiamata « Dos del Pater » (Dosso della preghiera). La forma, la tecnica di ottenimento, lo stato di usura non uniforme e la diversa patina del complesso coppelliforme, consentono di attribuire tale assieme a tempi successivi e non è da escludere che, data anche la posizione della roccia dominante parte del fondovalle, che si prestava come luogo di sosta, di preghiera, di raccoglimento, la tradizione di zona sacra abbia potuto persistere fino a tempi protostorici, se non anche posteriori.

Analoga sorte, d'altra parte, può riconoscersi a centinaia di località, un tempo luogo di culto di genti preistoriche e divenute poi sedi di chiesette o cappellette o crocifissi in tempi cristiani: in Valcamonica si può ricordare, per tutte, il Dosso del Capitello dei Due Pini, a nord di Paspardo.

Altro presumibile luogo di culto con le stesse caratteristiche della « Preda de l'Altar » potrebbe essere il « Dos de la Lüera », che si trova nel bosco

Due porzioni della cosiddetta Roccia di Pietro, di recente individuazione a Paspardo. Nella prima vi sono incisioni a forma di lancia. L'interesse della seconda è dato dalle figure antropomorfe (*in colore*) martellinate e sovrapposte alle incisioni lanciformi.

a monte della carrozzabile che sale dal fondovalle ai cantieri della centrale idroelettrica, circa 100 metri a valle del « Dos del Baití »; in località Fröff, in mezzo a un prato, spicca un macigno appoggiato obliquamente a un roccione di arenaria da cui è separato da alcune piccole pietre spigolose. La roccia di base sporge per un paio di metri dal terreno erboso, su una lunghezza di una decina di metri. Sulla parte superiore del masso vi sono 7 coppelle scavate dall'uomo, circolari a bordi arrotondati, di cui tre del diametro di 33 millimetri e le altre quattro di 28 millimetri. Anche sulla roccia di base sono state ricavate numerose altre coppelle, una delle quali a contorno ovale. Il « Dos de la Lüera » è troppo evidente per non essere stato già notato da altri e certo da tempo; tuttavia, a quanto risulta finora, non era stata mai pubblicata la possibile interpretazione come monumento megalitico in relazione alle coppelle esistenti su di esso.

Può sembrar strano che su questi massi vi siano soltanto coppelle e non vi si associno altre figurazioni, tanto diffuse nella valle: questa iconofobia potrebbe significare che le zone erano state prescelte come località sacrali destinate esclusivamente allo svolgimento di pratiche magico-religiose, al di fuori di ogni altra estrinsecazione culturale o d'ordine pratico. Ovviamente alla base di tutte queste interpretazioni rimane il problema, praticamente insoluto, di sapere a che cosa servissero in pratica le coppelle. In proposito gli studiosi hanno espresso molti pareri, spesso discordi, contenuti nella vastissima bibliografia archeologica.

Sulle varie ipotesi, come quella che vorrebbe si fosse trattato di simboli della produzione del fuoco, o altre piú vicine al culto eliolatrico, sembrano prevalere le idee connesse alla posa di offerte di vario genere o al contenimento di sostanze fumiganti odorose o anche di olii o grassi che, accesi, avrebbero accompagnato, con le loro fiammelle, gli episodi cerimoniali. Certo la mancanza di reperti di qualsiasi genere costituisce un momento di grande fragilità nella formulazione di tutte le ipotesi e permane pertanto l'antitesi di conoscere con buona attendibilità i fatti senza distinguere bene la loro genesi.

Altre coppelle che compaiono sulle rocce camune si prestano peraltro anche ad altre interpretazioni: una figurazione scoperta sulla Roccia Ruggeri, accanto a una delle costruzioni di cui si è data notizia, sembra apportare un nuovo elemento accettabile. Si tratta qui, e non è il solo esempio tra i numerosi petroglifi vallivi, di un'incisione serpentiforme, a zig-zag, che termina con una grossa coppella; vedrei in incisioni di questo tipo la volontà di raffigurare i lampi e, nella coppella al termine del solco, il tuono materializzato in qualche cosa che appartiene al mondo soprannaturale e al tempo stesso delle forze naturali. Forse poté anche essere osservata, talvolta, la traccia di qualche saetta scaricatasi sulle rocce e, trovata qualche coppella o crepa naturale, si poté supporre essere questa la conseguenza di quella manifestazione di ira celeste. Ripeterne il segno significò, quindi, propiziarsi tali formidabili forze, essere in grado cioè di imprigionarne e guidarne la potenza.

Il « modulo 8 »

Ma il campo delle coppelle è ancora molto vasto tra le incisioni della nostra Valcamonica e un certo gruppo si stacca nettamente per tecnica, tipologia e significato da quelle alle quali si è finora accennato.

Nel complesso ho potuto individuare un elemento interessante quanto singolare che abbiamo chiamato « modulo 8 », costituito da un gruppetto appunto di otto coppelle, solitamente piccole (del diametro cioè di uno o due centimetri), che si susseguono secondo una disposizione costante su rocce diverse distanti anche diverse centinaia di metri l'una dall'altra. Finora ho potuto riscontrare tale modulo nel Parco di Naquane sulle rocce n. 1, 25, 27, 29, 35, 44, 45, 47, 48, 74; altre zone sono all'esame.

Le piccole incisioni, che non sono sempre ottenute con identica tecnica di martellinatura, ma talvolta si presentano come vere coppelline regolari a sezione concava, talaltra come semplici zone a contorno circolare appena superficiali, sono disposte costantemente secondo l'ordine 1, 2, 2, 1, 2; raramente quelle appaiate sono collegate da breve canaletto.

La disformità di tecnica e l'uniformità della loro disposizione fa supporre si tratti di realizzazioni contemporanee su rocce diverse o di persistenza di un concetto uniforme in tempi diversi, a meno che la diversità di martellinatura possa essere la dipendenza del diverso utensile usato o della diversa abilità dell'artefice. In ogni caso ciò lascia pensare che una distinzione cronologica basata sulla tipologia dell'incisione debba essere presa con una certa cautela e il caso si presta a una estrapolazione anche per i petroglifi di altro genere.

Circa il significato di questo « modulo 8 » è evidente che non si possa ancora dire una parola sicura: a un primo esame parrebbe logico attribuire un significato numerico, il che non esclude, tuttavia, che esso corrisponda a un concetto, o astratto o concreto, cioè costituisca una formula, una parola d'ordine, un simbolo pittografico di interpretazione univoca.

La sua riconosciuta importanza è messa altresí in risalto dall'esistenza di alcune incisioni nelle quali detto modulo si presenta contornato da un solco ovale, piú o meno regolare, che lo delimita e lo mette in risalto.

Vengono alla mente a tale riguardo le famose « cartouches » entro le quali venivano iscritti i nomi dei faraoni e che servirono egregiamente a Champoillon come punto di partenza per la decifrazione dei geroglifici egiziani.

Non possiamo perciò escludere che trattisi anche qui di un nome, di una formula, di un toponimo o altra espressione importante, di valore diffuso e categorico. È in ogni caso di grande interesse ricordare come le « coppelle » siano state l'oggetto di leggende e superstizioni e che nelle credenze popolari spesso vengano attribuite a fate, gnomi, giganti, esseri soprannaturali: ciò convalida l'idea che esse siano state legate a riti di cui è filtrato, attraverso i tempi, il ricordo.

Le incisioni filiformi

Un campo di non minor interesse è quello costituito dalle incisioni filiformi, le quali si sono presentate numerose e variate sulla Roccia Ruggeri da noi scoperta. La notevole varietà di queste figure è già stata oggetto di uno studio particolare; basterà qui ricordare che esse poterono essere raggruppate nelle seguenti classi: figure geometriche a tratti perpendicolari tipo scacchiera o a tratti perpendicolari alternati ad altri diagonali, figure geometriche tipo mulinello o tria o filetto, figure alberiformi, figure umane appiedate, figure umane a cavallo, stelle, archi, segni diversi e lettere alfabetiche.

Giova anche qui rilevare che prendendo lo spunto da quelle scoperte sulla roccia predetta, si vollero esaminare minutamente anche molte altre rocce del Parco di Naquane e vi si rinvennero infatti molte incisioni del medesimo tipo, che risultano finora per la massima parte inedite ed è presumibile siano state o trascurate o ignorate.

In realtà il loro interesse risulta duplice: da un lato troviamo una loro tipologia in buona parte concettualmente poco arcaica, dall'altro canto si sono individuate incisioni di questo tipo che soggiacciono ad altre di tipo martellinato attribuibili a epoca preistorica.

Fra le varie figurazioni un cenno particolare meritano quelle delle scuri a manico a doppia curvatura, per la loro diffusione su rocce diverse e per l'analogia che esse presentano sia con utensili noti in alcune stazioni preistoriche, sia con raffigurazioni esistenti su altri utensili. Per il primo raffronto ricordo le scuri di Weesen del Cantone di S. Gallo e di Giubiasco nel Canton Ticino esposte nel Museo Nazionale di Zurigo, e quelle di non sicura provenienza esposte nel Museo di St. Gervais en Laye, presso Parigi.

Piú interessante pare invece il parallelo con le figure incise su due rasoi dell'età del ferro, uno conservato al Museo di Bologna e uno risultante nel corredo della Tomba 94 della necropoli di Terni. Le riproduzioni di scuri che abbiamo individuato sulle rocce n. 44, 61 e 74, acquistano da tale ravvicinamento un maggior significato sacrale.

Una delle località oggetto delle nostre ricognizioni è stata quella a nord di Paspardo dove, a cura del giovane Auxilio Priuli e di Pietro Ferrari, scomparso poi in seguito a tragico incidente, già nel 1969 era stato individuato un masso che presentava incisioni di tipo insolito: la località, nota come Roccia di Pietro sulle pendici occidentali del Monte Tredenus, presenta un grosso roccione che sporgeva parzialmente e che venne liberato in nostra presenza da una coltre terrosa di circa 20 centimetri di spessore. Esso si presenta ora con la parte superiore pianeggiante leggermente ondulata e attraversata da alcune fessure, mentre la parte meridionale precipita verso valle con speroni verticali separati da profondi incavi naturali. Sulla parte superiore si trovano allineate decine di incisioni che raffigurano delle lance o altri strumenti analoghi, ottenute per lo piú approfondendo un poco le incisioni naturali prodotte dal ghiacciaio e munendo ogni asta cosí risultante con una punta, incisa, di forma variata, piú o meno lanceolata, talvolta triangolare o a losanga, talvolta con alette e altri dettagli di grande interesse.

L'insieme è di grande suggestione, data anche la posizione elevata del luogo e la concentrazione di incisioni del medesimo tipo alquanto insolite nel restante complesso petroglifico camuno. Alcuni grossi sassi allineati parrebbero i resti della delimitazione di un ambiente dell'insediamento.

Prezioso per una valutazione cronologica relativa si presenta un gruppo di incisioni martellinate che sono sovrapposte alle lance in parola e che raffigurano uomini a braccia alzate e gambe divaricate.

L'ultima zona oggetto di ricerche è stata infine quella in pieno bosco del Parco di Naquane, nelle vicinanze dell'alta rupe del Coren del Valento, dove si fece il ritrovamento forse piú problematico: una scalinata formata da pietre rozzamente squadrate e senza legante, disposte lungo il pendio per una lunghezza di circa tre metri e mezzo; la parte piú bassa è costituita da un'unico gradino della larghezza di soli 30 cm, dal quale la gradinata sale con 9 scalini aprendosi a ventaglio fino all'estremità superiore lunga metri 1,80.

Benché la presenza di un manufatto del genere in pieno bosco parrebbe potersi riferire a tempi molto arcaici, una tale valutazione va presa con estrema cautela finché non saranno trovati elementi che confermino tale ipotesi.

Conclusione

L'esame e l'interpretazione del mondo dei petroglifi camuni sono ancora lontani dal completamento, anche se da anni essi costituiscono l'oggetto di ricerche e di meditazioni di numerosi studiosi; una domanda parve per molto tempo presentarsi logica a tutti e cioè come mai soltanto in Valcamonica si trovava un tale complesso di arte rupestre. A mano a mano che le indagini proseguivano si trovò poi che il campo di studio andava allargandosi a macchia d'olio e se qui nella nostra valle si riscontrava la maggior concentrazione, sempre piú numerose erano le altre località che presentavano interesse nello stesso ordine d'idee: ultima, forse, in ordine di tempo, la Valtellina in cui son venute alla luce incisioni che sotto molti aspetti presentano seducenti punti di contatto con quelle della Valcamonica.

Il lavoro da compiere è dunque ancora molto e c'è posto per tutti coloro che, con onestà e competenza, intendono dedicarvisi.

GIOCHI MATEMATICI

di Martin Gardner

Meravigliosi giochi di prestigio matematici con le carte che non richiedono prestidigitazione

« Le piacciono i giochi di prestigio con le carte? »
« No – risposi – li detesto ».
« Allora gliene farò solo uno ».
E me ne fece tre.
SOMERSET MAUGHAM, *Il signor Sa-tutto*

La familiarità di Maugham con i maghi delle carte è anche troppo nota. « Non mi piace affatto la gente che fa giochi di prestigio con le carte », scrisse una volta Elsa Maxwell (cito dall'autobiografia di una maga, *You Don't Have to Be Crazy*, di Frances Ireland). « Non si accontenta di fare uno o due giochi, ma prosegue instancabile a farvi prendere carte, o scoprirne, o coprirne, finché non ne potete piú ».

I giochi di prestigio matematici con le carte, ammettiamolo subito, sono precisamente quel tipo di giochi che piú infastidisce molta gente; essi hanno nondimeno uno strano fascino sui matematici e sui prestigiatori dotati di una mentalità matematica. Centinaia di nuovi giochi con le carte vengono pubblicati ogni anno in periodici dedicati ai trucchi e giochi di prestigio, e particolarmente nella « Pallbearers Review ». È questo un mensile di 4-8 pagine, che è curato dall'inventore di giochi Karl Fulves. È stato detto, benché Fulves neghi, che il titolo (che in italiano suona « Rivista dei necrofori ») contenga un riferimento ironico all'opinione diffusa tra i prestigiatori professionisti che « la magia è morta ». (Devo avvertire chi desideri abbonarsi al periodico che troverà inintelligibili le spiegazioni della maggior parte dei giochi, se non conosce almeno i rudimenti dell'illusionismo.)

Molti eccellenti giochi illusionistici con le carte si fondano su un principio di parità, ma la struttura pari-dispari che sta alla base del gioco è nascosta di solito in modo cosí ingegnoso che se seguite le istruzioni con le carte in mano resterete probabilmente sorpresi. Consideriamo la seguente versione semplificata di un gioco di prestigio inventato da George Sands e pubblicato una ventina d'anni fa in un periodico di magia intitolato « The Genii ». I prestigiatori lo definiscono un effetto a « olio e acqua » per ragioni che appariranno subito chiare. Ci sono molti modi di ottenere lo stesso effetto con « mosse » segrete e difficili, ma questa versione funziona in modo assolutamente automatico.

Si estraggano dal mazzo 10 carte rosse e 10 carte nere e le si disponga in due pile scoperte, l'una accanto all'altra, con tutte le carte rosse nella pila di sinistra e tutte le carte nere nella pila di destra. Dite innanzitutto ai vostri spettatori che comincerete dando una dimostrazione del gioco nella quale procederete usando solo cinque carte di ciascun colore. Con entrambe le mani simultaneamente prendete la prima carta su ognuna delle due pile e collocatela, ancora scoperta, sul tavolo accanto a ciascuna delle due pile iniziali. Fate lo stesso con la seconda carta di ciascuna delle due pile, ma questa volta incrociando le braccia prima di collocare le due carte sulle due nuove pile che state iniziando. Il risultato sarà quello di mettere una carta nera sulla rossa e una carta rossa sulla nera. Si continua cosí spostando una coppia di carte in modo regolare, la successiva di nuovo con braccia incrociate e la quinta e ultima ancora senza incrociare le braccia. In altri termini, ci sono stati cinque alzate di carte, e solo due con braccia incrociate. Su ciascuno dei due lati abbiamo ora una pila di carte scoperte a colori alternati. Ponete una pila sull'altra. Aprite leggermente le dieci carte a ventaglio per far vedere che c'è un'alternanza totale dei colori.

Riordinate il mazzetto e voltatelo in modo che le carte rimangano coperte. Alzate ora le carte a cominciare dall'alto e disponetele a faccia in su a riformare due pile, ponendo alternativamente le carte a sinistra e a destra. Richiamate l'attenzione sul fatto che questo procedimento separa naturalmente i colori. Alla fine avrete cinque carte rosse a sinistra e cinque carte nere a destra.

Annunciate che ripeterete questa semplice serie di operazione con le 20 carte. Cominciate come prima, con 10 carte rosse scoperte a sinistra e 10 carte nere scoperte a destra. Trasferite le carte in due nuove pile, che formerete come in precedenza, incrociando le braccia a ogni alzata pari, in modo che in ogni pila i colori si alternino. Una volta alzate tutte le 20 carte, ponete una pila sull'altra, squadrate bene il mazzo, voltatelo e tenetelo con le carte coperte nella mano sinistra.

Alzate 10 carte a faccia in su per formare due pile andando da sinistra a destra, osservando a voce alta che questo procedimento riunisce insieme le carte rosse a sinistra e le nere a destra. Dopo aver posato a faccia in su le prime dieci carte non fermatevi ma continuate regolarmente e collocate le restanti dieci carte a faccia in giú. È meglio disporre le carte non facendole coincidere, ma sfalsandole in modo che formino due colonne verticali (*si veda la figura nella pagina a fronte*).

Raccogliete le cinque carte coperte nella colonna di sinistra con la mano sinistra e le cinque carte coperte nella colonna di destra con la mano destra. Incrociate le braccia e mettete giú nuovamente le carte, spiegando che avete trasferito metà delle carte di ciascuna pila alla pila del colore opposto, ma che, come l'olio e l'acqua, i colori si rifiutano misteriosamente di mescolarsi. Scoprite le carte coperte. Con sorpresa di tutti (speriamo!) le carte rosse sono di nuovo con le rosse e le nere con le nere! I lettori avranno poca difficoltà a scoprire perché il gioco funziona con qualsiasi insieme di carte in cui ci sia un numero pari di carte di ciascun colore e non quando si fa la dimostrazione con cinque carte rosse e cinque nere.

Una volta terminato il gioco dell'olio e dell'acqua, mettete le due pile una sull'altra, lasciando in alto le carte rosse o quelle nere. Voltate il mazzo mantenendo le carte coperte e apritelo a ventaglio. A questo punto siete pronti a eseguire un gioco di prestigio fondato sui colori inventato da Fulves e pubblicato nella sua rivista nel settembre 1971.

Chiedete a qualcuno di tirare leggermente fuori dieci carte di sua scelta. Il ventaglio avrà l'aspetto di quello riportato nella figura a pagina 94. Con la destra contate le carte sporgenti per avere la sicurezza che siano veramente 10. Fate ciò prendendo le carte una per volta da destra a sinistra, disponendole in una pila coperta e contando da uno a 10. Chiudete le 10 carte restanti nella mano sinistra e collocatele in una seconda pila coperta accanto alla prima.

Annunciate ai vostri spettatori che è accaduta una cosa meravigliosa. Benché le 10 carte siano state scelte a caso, i colori nelle due pile sono cosí ordinati che ogni n-esima carta in una pila ha il colore opposto a quello della n-esima carta dell'altra pila. Per dimostrare questo fatto, voltate simultaneamente la prima carta di ciascuna delle due pile. Una sarà rossa e l'altra nera. Collocate la carta nera sotto la rossa, voltate la coppia e posatela da parte sul tavolo per formare una nuova pila a faccia in giú. Ripetete il procedimento con le carte che si trovano ora sopra le due pile iniziali. Anch'esse saranno una rossa e l'altra nera, e lo stesso vale per tutte le coppie di carte che alzerete!

Mostrando le coppie di carte, mettete sempre la carta nera sotto la rossa prima di voltarle e collocarle sulla terza pila. Una volta terminata quest'operazione, le carte in questa fila coperta avranno colore alterno.

A questo punto siete pronti a eseguire un gioco di prestigio davvero sconcertante in cui la parità viene conservata benché le carte vengano mescolate ripetutamente. Noto come « Schema del colore », questo gioco fu inventato da Oscar Weigle, un prestigiatore dilettante che è ora redattore da Grosset & Dunlap. Esso fu venduto sotto forma di manoscritto nei negozi di giochi e trucchi nel 1949.

Date a qualcuno il mazzo di 20 carte e chiedetegli di tenerlo sotto il tavolo dove né lui né altri sono in grado di vedere le carte. Ditegli di mescolare le carte nel modo seguente. (Questo gioco è noto come gioco di Hummer, il prestigiatore che per primo lo usò nei suoi giochi di prestigio.) Rovesciate le prime due carte (non una per volta ma tutte e due assieme, come se fossero una sola carta), collocatele sul mazzo e tagliatelo. Il vostro assistente può ripetere questo procedimento di rovesciare due carte, tagliare, rovesciare altre due carte, tagliare, e cosí via, finché lo desidera. Ne risulterà ovviamente un mazzo contenente un numero ignoto di carte rovesciate distribuite a caso.

Dite ora al vostro assistente, che terrà ancora le carte sotto il tavolo, di trasferire la prima carta sotto il mazzo, poi di rovesciare la carta successiva, tirarla fuori da sotto il tavolo e posarla sul tavolo. Il procedimento dev'essere poi ripetuto, finché saranno collocate sul tavolo 10 carte. Si vedrà allora che le carte si sono misteriosamente ordinate. Tutte le carte con la faccia rivolta verso l'alto sono dello stesso colore, e tutte le carte coperte risulteranno del colore opposto.

Illustriamo ora la seconda e piú appassionante parte del gioco, che Weigle confessa essere un « manifesto raggiro ». Il vostro assistente tiene ancora 10 carte sotto il tavolo. Chiedetegli di mescolarle separandole in due mazzetti e poi, mantenendo piane tutte le carte (nessuna carta dev'essere rovesciata), di inserire i due mazzetti l'uno nell'altro in un modo del tutto casuale. Potete far vedere in che modo compiere quest'operazione usando le 10 carte già posate sul tavolo. Dopo che il vostro assistente avrà mescolato in tal modo le carte alcune volte, chiedetegli di rovesciare l'intero mazzetto e di rimescolarlo nello stesso modo per alcune altre volte. Se vuole, può infine tagliare il mazzo.

Ora egli riprende il procedimento seguito in precedenza: una carta viene passata sotto il mazzo, la seconda viene rovesciata e posata sul tavolo. (L'ultima carta viene rovesciata e posata sul tavolo.) Nonostante che le carte siano state rimescolate a fondo, il risultato è esattamente lo stesso di prima. Tutte le carte a faccia in su sa-

L'effetto « olio e acqua ».

ranno dello stesso colore delle carte presentate a faccia in su in precedenza, e lo stesso vale per tutte le carte presentate coperte.

Uno degli esercizi piú antichi nei giochi di carte consiste nell'individuare e presentare in qualche modo sensazionale una carta che è stata scelta a caso e rimessa nel mazzo. Ecco un semplice metodo che sfrutta una tecnica di estrazione binaria. Fulves lo pubblicò nella sua rivista nel novembre del 1970.

Prendete 16 carte da un mazzo ben mescolato e distribuitele coperte sul tavolo senza dire quante carte stiate usando. Uno spettatore sceglie una carta, la guarda e la colloca sul mazzo. Le restanti carte distribuite sul tavolo vengono raccolte in un mazzetto e collocate a loro volta sul mazzo, sopra la carta scelta dallo spettatore. Chiedetegli di prendere dal tavolo una metà circa del mazzo, con l'approssimazione di una mezza dozzina di carte. Di fatto egli può prendere fra le 16 e le 32 carte e vi porge questo mazzetto.

Tenete il mazzetto con entrambe le mani. Man mano che il vostro pollice sinistro spinge le carte, una per volta, verso destra, muovete avanti e indietro la mano destra in modo che una carta su due, partendo dalla prima, venga a sporgere in avanti. Il ventaglio di carte risultante assomiglierà a quella della figura in questa pagina, a parte il fatto che le carte sporgenti non sono distribuite a caso. Togliete dal ventaglio di carte tutte quelle sporgenti e scartatele. Squadrate per bene le carte restanti e ripetete il procedimento, spingendo in fuori tutte le carte che si trovano nelle posizioni dispari, a cominciare dalla prima carta. Prendete poi le carte sporgenti ed eliminatele. Continuate in questo modo finché rimane una carta. Prima di scoprirla chiedete qual è la carta scelta. Sarà appunto la carta che avete in mano.

Un metodo completamente diverso di individuare una carta scelta in precedenza è spiegato in un libro di giochi di prestigio del 1968 di Eddie Field e Jon Racherbaumer, *The Artful Dodges of Eddie Field*. Voltatevi e spiegate a qualcuno come tagliare un mazzo di carte, dopo averlo mescolato, in tre pile approssimativamente uguali. Il vostro assistente dovrà rovesciare ogni pila e poi ricostruire il mazzo collocando una pila di carte a faccia in su in mezzo alle altre due, che rimangono coperte. Ditegli allora di tenere a mente la prima carta della pila a faccia in su. Stando ancora con le spalle voltate, chiedetegli di tagliare il mazzo piú volte, e poi di mescolare a fondo le carte dividendole in due mazzetti che vengono inseriti l'uno nell'altro. Quest'operazione distribuirà naturalmente in modo casuale le carte a faccia in su in tutto il mazzo.

Voltatevi, rovesciate il mazzo e distribuite ordinatamente le carte su una riga. Cercate una lunga serie di carte a faccia in su, ricordando che un taglio può aver diviso la serie in modo che una parte di essa sia alla fine e una parte all'inizio della riga di carte. La prima carta coperta prima della riga è quella scelta. Prendetela, fatevi dire qual era la carta scelta e scopritela.

Il nostro ultimo gioco, fondato su un curioso principio per scozzare le carte scoperto da Fulves, è presentato come una proposta di gioco d'azzardo. Tutte le carte di un seme (che può essere scelto dalla vittima designata) vengono tolte dal mazzo. Supponiamo che il seme scartato sia quadri. Le carte restanti vengono accozzate in modo tale che ogni terzetto abbia i tre diversi semi nello stesso ordine. (I valori delle carte non contano.) A indicare la successione può essere di nuovo la vittima e supponiamo che scelga picche, cuori e fiori. Il mazzo di 39 carte viene sistemato dall'alto al basso in modo che i semi rispettino la sequenza picche, cuori, fiori, picche, cuori, fiori e cosí via.

Collocate il mazzo con la faccia verso l'alto di fronte alla vittima. Chiedetele di tagliare il mazzo in due e di mescolare le carte profondamente inserendo i mazzetti l'uno nell'altro. Quando la vittima taglia il mazzo, osservate il seme presentato dal mazzetto *inferiore*. Chiameremo questo seme k. Dopo questa semplice mescolata, il mazzo è rovesciato in modo che le carte presentino la faccia in basso. Le carte vengono prese ora dall'alto tre per volta, e si esamina ogni terzetto per vedere se contiene due carte dello stesso seme.

È difficile crederlo, ma:

1) Se k è picche, nessun terzetto conterrà due carte di picche.

2) Se k è cuori, nessun terzetto conterrà due carte di fiori.

3) Se k è fiori, nessun terzetto conterrà due carte di cuori.

Queste conclusioni presuppongono ovviamente un ordinamento picche-cuori-fiori. Se la sequenza è diversa, le tre regole devono essere corrispondentemente modificate; ossia in esse la parola « picche » dovrà essere sostituita col nome del seme che compare per primo nel terzetto, e cosí via. Poniamo che m sia il seme che voi sapete non potersi presentare due volte in nessun terzetto, e a e b siano invece i semi che possono farlo.

Prima di alzare le carte e andare a vedere i terzetti formatisi, proponete la seguente scommessa. Per ogni terzetto contenente una coppia di m voi pagherete alla vittima 10 000 lire; questa vi pagherà a sua volta 100 lire per ogni coppia di a o di b. La scommessa sembra buona per la vittima, ma è impossibile che voi perdiate e il raggiro può essere ripetuto finché ne avete voglia. Risistemate subito le carte e consentite alla vittima di mescolarle, tagliando il mazzo e inserendo i due mazzetti risultanti uno nell'altro. Naturalmente promettete sempre alla vittima di pagare per la coppia che non potrà uscire. Il fatto che il seme possa variare da una mano all'altra contribuisce alla migliore riuscita dell'imbroglio.

Come ha osservato Fulves, i terzetti hanno altre proprietà inattese. Dei tripletti contenenti coppie, quelli con coppie di a si alterneranno a quelli con coppie di b; dopo una coppia di a, la prossima coppia sarà di b e viceversa. Nelle coppie, un seme avrà sempre la prima carta, l'altro seme sempre l'ultima.

Nessuna spiegazione di questi giochi sarà data nel numero prossimo. I lettori possono però dilettarsi ad analizzare ogni gioco per vedere se riescono a capire esattamente com'è possibile che esso funzioni con una tale misteriosa precisione.

Dieci carte tirate in fuori.

Il mese scorso abbiamo descritto una variante del filetto (inventata da David L. Silverman) nella quale un giocatore, diciamo X, vince quando appare una riga di tre simboli uguali (di un tipo o dell'altro, non importa); in caso contrario vince O. In questo tipo di filetto X vince sempre sia che giochi per primo sia che giochi per secondo. Supponiamo che le caselle siano numerate (da sinistra a destra e dall'alto in basso) dall'1 al 9. Ecco la dimostrazione di Silverman.

Se X inizia occupa la casella 1. O deve quindi occupare 5 altrimenti X riesce a piazzare tre segni in fila secondo la normale strategia del filetto. $X2$ forza $O3$, poi $X4$ forza $O7$, realizzando cosí tre O in riga che danno la vittoria a X.

Se O inizia il gioco, ha la possibilità di scegliere una apertura d'angolo, di lato o centrale. Se apre al centro (5), X risponde con 1. Se la mossa è $O2$, $X7$ forza $O4$ e poi $X9$ forza $O8$ che perde. Se la seconda mossa di O è 3, $X4$ forza $O7$ che perde nuovamente. Se la seconda mossa di O è 6, $X7$ costringe O a perdere in 4. Se la seconda mossa di O è 9, $X2$ forza $O3$ e quindi $X4$ costringe O a perdere in 7. Tutte le altre strategie di gioco sono simmetricamente equivalenti a queste.

Se O apre di lato, per esempio in 4, la mossa vincente è $X5$. Come prima, vi sono quattro strategie di gioco fondamentali e diverse: 1) $O1$, $X3$, $O7$ (perde); 2) $O2$, $X3$, $O7$, $X9$, $O1$ (perde); 3) $O3$, $X9$, $O1$, $X8$, $O2$ (perde); 4) $O6$, $X3$, $O7$, $X9$, $O1$ (perde).

Se O apre d'angolo, per esempio in 1, la sua mossa può essere bloccata da $X5$, dopo di che si hanno di nuovo quattro diverse linee di sviluppo: 1) $O2$, $X7$, $O3$ (perde); 2) $O3$, $X8$, $O2$ (perde); 3) $O6$, $X8$, $O2$, $X7$, $O3$ (perde); 4) $O9$, $X2$, $O8$, $X3$, $O7$ (perde).

Quando questo gioco si svolge su una scacchiera quattro per quattro (X vince se vi sono quattro simboli in fila, O vince in caso contrario), il gioco risulta enormemente piú complicato e Silverman non lo ha ancora analizzato completamente.

Nel problema di go muku proposto sempre da Silverman, O vince se la sua prima mossa è $O1$ (*si veda la figura in questa pagina*). $X2$ risulta forzato, $O3$ forza $X4$, $O5$ forza $X6$, quindi $O7$ crea una diagonale aperta di quattro O che X non è in grado di bloccare; infatti, se X gioca a un'estremità della diagonale O vince giocando all'altra estremità. Come Silverman sottolinea nel suo libro, O vince solo contrattaccando; perde invece rapidamente se gioca in difesa tentando di bloccare la diagonale aperta di tre realizzata da X.

Soluzione al problema del go muku.